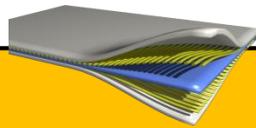




UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
MENTION
GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL
PARCOURS
GENIE INDUSTRIEL



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur grade Master en
Génie Industriel



***ETUDE ET EVALUATION THEORIQUE DES CONSTANTES
ELASTIQUES DES DEUX PLIS UNIDIRECTIONNELS
SISAL/POLYESTER ET BAMBOU/POLYESTER***



Présenté par :

RAKOTOMANANA Michaël Godin

RAKOTOMANANA Iréna Arivony

Sous la direction de :

Monsieur RASOLDIER Olivier

Promotion 2013-2014



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
MENTION
GENIE MECANIQUE ET INDUSTRIEL
PARCOURS
GENIE INDUSTRIEL



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur grade Master en
Génie Industriel

***ETUDE ET EVALUATION THEORIQUE DES CONSTANTES
ELASTIQUES DES DEUX PLIS UNIDIRECTIONNELS
SISAL/POLYESTER ET BAMBOU/POLYESTER***

Présenté et soutenu par :

RAKOTOMANANA Michaël Godin

RAKOTOMANANA Iréna Arivony

Président du Jury :

Monsieur RANDRIAMORASATA Josoa Albert

Directeur de Mémoire :

Monsieur RASOLDIER Olivier

Membres de jury :

Monsieur RANDRIANATOANDRO Grégoire

Monsieur RAVELOJAONA Johnson

Monsieur JOELIHARITAHAKA Rabeatoandro

Soutenu le 12 Septembre 2015

Promotion 2013-2014

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à remercier **DIEU Tout Puissant**, qui par sa grâce et sa volonté, a permis que ce mémoire puisse être réalisé.

Nos sincères et vifs remerciements s'adressent aussi aux personnes suivantes :

- Monsieur **ANDRIANARY Philippe Antoine**, Professeur Titulaire et Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, d'avoir assuré le bon déroulement des études dans cette école.
- Monsieur **RAKOTOMANANA Charles Rodin**, Chef de Département Génie Mécanique et Productique et Responsable de la Mention Génie Mécanique et Industriel et du Parcours Génie Industriel, qui a coordonné le déroulement de l'enseignement au sein de notre Département et n'a pas ménagé ses efforts et son temps pour promouvoir ce Parcours Génie Industriel.
- Monsieur **RANDRIAMORASATA Josoa Albert**, Professeur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui nous a fait le grand honneur de présider la soutenance de ce mémoire.
- Monsieur **RASOLDIER Olivier**, Maître de Conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et Directeur de ce travail de mémoire, qui a consacré du temps afin de mener à bien ce travail par ses précieux conseils et ses critiques constructives malgré ses lourdes responsabilités.

Nos profondes reconnaissances vont également à l'endroit des membres du Jury :

- Monsieur **RANDRIANATOANDRO Grégoire**, Monsieur **RAVELOJAONA Johnson** et Monsieur **JOELIHARITAHAKA Rabeatoandro**, Enseignants Chercheurs à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, pour avoir accepté de porter leur jugement sur notre travail.

Sans les enseignants et le personnel de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, nos efforts n'aboutissent à rien. Qu'ils veulent bien accepter nos vifs remerciements.

Nous n'oublions pas d'exprimer toute notre sympathie à tous les collègues du parcours Génie Industriel de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, en particulier à ceux de la classe Master 2 Génie Industriel 2013/2014, de l'esprit d'entraide et de camaraderie qu'ils ont su montrer tout au long de ces cinq années d'étude.

On ne saurait aussi comment exprimer notre sincère gratitude à toute la famille qui, par leur compréhension, leur réconfort, leur conseil, leur sacrifice, leur soutien moral, spirituel et financier, a bien voulu partager nos soucis et nos peines dans l'accomplissement de nos études et de ce mémoire.

Enfin, nous exprimons nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

REMERCIEMENTS	<i>i</i>
TABLE DES MATIERES	<i>iii</i>
LISTE DES ABREVIATIONS	<i>vi</i>
LISTE DES SYMBOLES	<i>vii</i>
LISTE DES TABLEAUX	<i>x</i>
LISTE DES FIGURES	<i>xi</i>
LISTE DES PHOTOS	<i>xiv</i>
INTRODUCTION	<i>1</i>
Chapitre 1. ETAT DE L'ART DES MATERIAUX COMPOSITES	
1-1- GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES	<i>5</i>
1-1-1- Définition	<i>5</i>
1-1-2- Historique	<i>5</i>
1-1-3- Intérêts de l'utilisation des composites	<i>7</i>
1-1-4- Constituants d'un matériau composite	<i>7</i>
1-1-4-1- Renfort	<i>7</i>
1-1-4-2- Matrice	<i>10</i>
1-2- ARCHITECTURE DES RENFORTS DANS UN COMPOSITE	<i>15</i>
1-2-1. Géométrie des renforts	<i>15</i>
1-2-2. Disposition des renforts	<i>16</i>
1-2-2-1- Disposition unidirectionnelle	<i>16</i>
1-2-2-2- Disposition bidirectionnelle	<i>17</i>
1-2-2-3- Disposition multidirectionnelle	<i>18</i>
1-2-2-4- Disposition aléatoire	<i>18</i>
1-3- STRUCTURE DES MATERIAUX COMPOSITES	<i>19</i>
1-3-1- Les plis	<i>19</i>
1-3-2- Stratifiés	<i>21</i>
1-3-3- Sandwichs	<i>22</i>

Chapitre 2. LES FIBRES NATURELLES

2-1- GENERALITES SUR LES FIBRES NATURELLES	24
2-1-1- Domaines d'utilisation	24
2-1-2- Types de fibres naturelles	24
2-1-3- Fibres d'origine animale	25
2-1-3-1- Soie naturelle	26
2-1-3-2- Laine	27
2-1-3-3- Poils	29
2-1-4- Fibres d'origine minérales	29
2-1-4-1- Le basalte	30
2-1-4-2- L'amiante	31
2-1-5- Fibres d'origine végétales	32
2-1-5-1- Principaux composants	33
2-1-5-2- Propriétés des fibres végétales	34
2-1-5-3- Avantages et inconvénients	35
2-1-5-4- Disponibilité en fibres végétales	37

Chapitre 3. LES FIBRES DE SISAL ET DE BAMBOU

3-1- SISAL	41
3-1-1- Localisation de la plante	42
3-1-2- Domaines d'utilisation	43
3-1-3- Quelques caractéristiques mécaniques des fibres	45
3-2- BAMBOU	46
3-2-1- Localisation de la plante	47
3-2-2- Anatomie de la plante	48
3-2-3- Domaines d'utilisation	50
3-2-4- Caractéristiques des bambous	51

Chapitre 4. CARACTERISTIQUES D'UN PLI DE COMPOSITE UNIDIRECTIONNEL

4-1- TENEURS EN VOLUME ET EN MASSE	57
4-1-1- Teneurs en volume	57
4-1-2- Teneurs en masse	57

4-2- MASSE VOLUMIQUE	58
4-3- CONSTANTES ELASTIQUES	58
4-4- RAPPELS SUR LA MECANIQUE DES MILIEUX CONTINUS	60
4-4-1- Tenseur des contraintes	60
4-4-2- Tenseur des déformations	60
4-4-3- Loi de Hooke généralisée	62
4-5- COMPORTEMENT D'UN PLI UNIDIRECTIONNEL	63
4-5-1- Par rapport au système d'axes naturels	64
4-5-2- Par rapport à un système d'axes (x, y)	65

Chapitre 5. ETUDE ET EVALUATION

5-1- HYPOTHESES	68
5-2- PRESENTATION DU LOGICIEL	69
5-3- PRESENTATION DES RESULTATS	72
5-3-1- Pli Sisal/Polyester	72
5-3-1-1- Constantes élastiques dans le repère (1, 2)	72
5-3-1-2- Constantes élastiques dans le repère (x, y)	80
5-3-2- Pli Bambou/Polyester	85
5-3-2-1- Constantes élastiques dans le repère (1, 2)	86
5-3-2-2- Constantes élastiques dans le repère (x, y)	93
5-4- PRECISION DES RESULTATS	100

Chapitre 6. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

6-1- LE BAMBOU ET L'ENVIRONNEMENT	105
6-2- LE SISAL ET L'ENVIRONNEMENT	106
6-3- LE POLYESTER ET L'ENVIRONNEMENT	106
6-4- LES IMPACTS POSITIFS ET NEGATIFS DES COMPOSITES ETUDIES SUR L'ENVIRONNEMENT	107
CONCLUSION	108
REFERENCES	I

Liste des abréviations

CMO : Composites à Matrice Organique

CMC : Composites à Matrice Céramique

CMM : Composites à Matrice Métallique

FAO : Food and Agriculture Organisation

FIDA : Fond International de Développement Agricole

MATLAB : Matrix Laboratory

ONUDI : Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel

PVC : Polychlorure de Vinyle

SAM : Société Agricole de Madagascar

SPSM : Société des Plantations de Sisal du Mandrare

UV : UltraViolet

Liste des symboles

Majuscules latines

E_1 : Module d'élasticité longitudinale du composite

E_2 : Module d'élasticité transversale du composite

E_{f1} : Module d'élasticité longitudinale des fibres

E_{f2} : Module d'élasticité transversale des fibres

E_m : Module d'élasticité de la matrice

G_{12} : Module de cisaillement du composite

G_{f12} : Module de cisaillement des fibres

G_{xy} : Module de cisaillement du composite dans le système d'axes (x, y)

M_f : Teneur en masse des fibres

M_m : Teneur en masse de la matrice

V_f : Teneur en volume des fibres

V_m : Teneur en volume de la matrice

V_v : Teneur en volume des vides

[S] : Matrice de souplesse

S_{ij} : Termes de la matrice de souplesse

\bar{S} : Matrice de souplesse dans le système d'axes (x, y)

\bar{S}_{ij} : Termes de la matrice de souplesse dans le système d'axes (x, y)

[Q] : Matrice de rigidité

Q_{ij} : Termes de la matrice de rigidité

$[\bar{Q}]$: Matrice de rigidité dans le système d'axes (x, y)

\bar{Q}_{ij} : Termes de la matrice de rigidité dans le système d'axes (x, y)

Minuscules latines

m : Masse du corps

m_f : Masse des fibres

m_m : Masse de la matrice

m_c : Masse du composite

v : Volume du corps

v_f : Volume des fibres

v_m : Volume de la matrice

v_c : Volume du composite

v_v : Volume des vides

Minuscules grecques

ρ : Masse volumique

ρ_c : Masse volumique du composite

ρ_f : Masse volumique des fibres

ρ_m : Masse volumique de la matrice

ν_{12} : Coefficient de Poisson du matériau relatif à la direction 1

ν_{21} : Coefficient de Poisson du matériau relatif à la direction 2

ν_{f12} : Coefficient de Poisson des fibres

ν_m : Coefficient de Poisson de la matrice

ν_{xy} : Coefficient de Poisson du matériau relatif à la direction x

σ_i : Contrainte normale appliquée au matériau dans la direction i

σ_x : Contrainte normale suivant x

σ_y : Contrainte normale suivant y

$[\sigma_{ij}]$: Matrice du tenseur des contraintes

τ_{ij} : Contrainte de cisaillement appliquée au matériau dans la direction j et présente dans le plan ayant pour axe normale i

τ_{xy} : Contrainte de cisaillement dans le plan xy

ε_i : Déformation relative du matériau dans la direction i

ε_x : Déformation relative suivant la direction x

ε_y : Déformation relative suivant la direction y

$[\varepsilon_{ij}]$: Matrice du tenseur des déformations

ε_{ij} : Termes de la matrice de déformation

γ_{ij} : Déformation angulaire subie par le matériau dans le plan ij

γ_{xy} : Déformation angulaire subie par le matériau dans le plan xy

Liste des tableaux

<i>Tableau 1-1: Caractéristiques mécaniques de quelques renforts</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 1-2: Caractéristiques mécaniques de quelques résines thermodurcissables</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 1-3: Caractéristiques mécaniques de quelques résines thermoplastiques</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 2-1: Liste des principaux pays producteurs de laine</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 2-2: Composants chimiques de certaines fibres</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 2-3: Propriétés mécaniques de quelques fibres végétales</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 2-4: Principaux avantages et inconvénients de l'utilisation des fibres végétales</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 3-1: Production mondiale de fibre de sisal en 2007</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 3-2: Quelques propriétés mécaniques d'une fibre de sisal</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 3-3: Distribution mondiale du bambou</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 3-4: Quelques propriétés mécaniques d'une fibre de bambou</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 5-1: Constantes élastiques du pli Sisal/ Polyester pour M_f égale à 30 et 78%</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 5-2: Constantes élastiques du pli Bambou/ Polyester pour M_f égale à 28 et 77%</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 5-3: Valeurs de E_1</i>	<i>103</i>

Liste des figures

<i>Figure 1-1: Différents types de renforts</i>	8
<i>Figure 1-2: Différents types de matrices</i>	10
<i>Figure 1-3: Structures moléculaires</i>	13
<i>Figure 1-4: Structures géométriques des renforts</i>	15
<i>Figure 1-5: Composite unidirectionnel</i>	17
<i>Figure 1-6: Les différents types d'armure</i>	18
<i>Figure 1-7: Pli unidirectionnel</i>	20
<i>Figure 1-8: Etapes d'obtention d'une structure stratifiée</i>	21
<i>Figure 1-9: Exemple de stratifié</i>	21
<i>Figure 1-10: Structure en sandwich</i>	22
<i>Figure 2-1: Classification des naturelles</i>	25
<i>Figure 2-2: Classification des fibres végétales</i>	33
<i>Figure 2-3: Répartition mondiale annuelle de la production de fibres végétales hors coton et bois</i>	37
<i>Figure 2-4: Production mondiale de fibres végétales hors coton et bois (2001-2008)</i>	37
<i>Figure 3-1: Anatomie de la plante</i>	48
<i>Figure 3-2: Section d'une tige de bambou</i>	50
<i>Figure 3-3: Coupe transversale d'un entrenœud</i>	51
<i>Figure 3-4: Phénomène d'instabilité dimensionnelle du bambou dans le béton</i>	52
<i>Figure 4-1: Directions pour un pli unidirectionnel</i>	56

<i>Figure 4-2: Stratifié</i>	56
<i>Figure 4-3: Système d'axes (1,2)</i>	59
<i>Figure 4-4: Systèmes d'axes (1,2) et (x, y)</i>	63
<i>Figure 5-1: Interface de démarrage</i>	69
<i>Figure 5-2: Première fenêtre du logiciel</i>	70
<i>Figure 5-3: Deuxième fenêtre du logiciel</i>	70
<i>Figure 5-4: Troisième fenêtre du logiciel</i>	71
<i>Figure 5-5: Quatrième fenêtre du logiciel</i>	71
<i>Figure 5-6: Cinquième fenêtre du logiciel</i>	72
<i>Figure 5-7: Variation de E_1 du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f</i>	73
<i>Figure 5-8: Variation de E_2 du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f</i>	74
<i>Figure 5-9: Variation de G_{12} du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f</i>	75
<i>Figure 5-10: Variation de ν_{12} du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f</i>	76
<i>Figure 5-11: Variation de ν_{21} du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f</i>	77
<i>Figure 5-12: Variation de ρ du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f</i>	78
<i>Figure 5-13 : Variation de E_X du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	80
<i>Figure 5-14 : Variation de E_Y du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	81
<i>Figure 5-15 : Variation de G_{XY} du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i> ...	82
<i>Figure 5-16 : Variation de ν_{XY} du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	83
<i>Figure 5-17 : Variation de ν_{YX} du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	84
<i>Figure 5-18 : Variation de E_1 du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f</i>	86
<i>Figure 5-19 : Variation de E_2 du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f</i>	87
<i>Figure 5-20 : Variation de G_{12} du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f</i>	88

<i>Figure 5-21 : Variation de v_{12} du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f</i>	<i>89</i>
<i>Figure 5-22 : Variation de v_{21} du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f</i>	<i>90</i>
<i>Figure 5-23 : Variation de ρ du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f</i>	<i>91</i>
<i>Figure 5-24: Variation de E_X du pli Bambou/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	<i>93</i>
<i>Figure 5-25 : Variation de E_Y du pli Bambou/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	<i>94</i>
<i>Figure 5-26 : Variation de G_{XY} du pli Bambou/Polyester</i>	
<i>en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	<i>95</i>
<i>Figure 5-27 : Variation de v_{XY} du pli Bambou/Polyester</i>	
<i>en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	<i>96</i>
<i>Figure 5-28 : Variation de v_{YX} du pli Bambou/Polyester</i>	
<i>en fonction de θ ($M_f = 70\%$)</i>	<i>97</i>
<i>Figure 5-29 : Variation de E_1 en fonction de M_f des plis Sisal/Polyester</i>	
<i>Bambou/Polyester-Verre/Polyester</i>	<i>99</i>
<i>Figure 5-30 : Variation de ρ en fonction de M_f des plis Sisal/Polyester-Bambou/Polyester-</i>	
<i>Verre/Polyester</i>	<i>100</i>
<i>Figure 5-31 : Ecart des valeurs de E_1 du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f</i>	<i>101</i>
<i>Figure 5-32 : Ecart des valeurs de E_1 du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f</i>	<i>102</i>

Liste des photos

<i>Photo 1-1: Torchis</i>	5
<i>Photo 1-2: Arc Mongol</i>	6
<i>Photo 1-3: La Corvette C1</i>	6
<i>Photo 1-4 : Mat de fibres de verre</i>	19
<i>Photo 1-5 : Plis en fibres de Carbone/Epoxy</i>	19
<i>Photo 1-6 : Pli unidirectionnel à fibres de Carbone/Epoxy</i>	20
<i>Photo 2-1: Bombyx du murier</i>	26
<i>Photo 2-2: Cocon du bombyx</i>	26
<i>Photo 2-3: Araignée</i>	27
<i>Photo 2-4: Toile d'araignée</i>	27
<i>Photo 2-5: Rouleau de laine de mouton pour l'isolation</i>	29
<i>Photo 2-6: Basalte à l'état brut</i>	30
<i>Photo 2-7: Fibres de basalte</i>	31
<i>Photo 2-8: Tissu de basalte</i>	31
<i>Photo 2-9: L'amiante à l'état brut</i>	32
<i>Photo 2-10: Fibres d'amiante</i>	32
<i>Photo 3-1: Fibres de sisal</i>	41
<i>Photo 3-2: Plantation du sisal à Berenty</i>	43
<i>Photo 3-3: Cordes en sisal</i>	43
<i>Photo 3-4: Exemple de macramé en sisal</i>	44
<i>Photo 3-5: Bambou</i>	46

<i>Photo 3-6: Types de chaumes</i>	<i>49</i>
<i>Photo 3-7: Fibres de bambou</i>	<i>51</i>

INTRODUCTION

De nos jours, les matériaux composites à fibres synthétiques jouent un rôle très important dans divers secteurs industriels. En effet, grâce à leur performance, leur légèreté et leur facilité de mise en œuvre, on les utilise dans les domaines de la construction automobile, aéronavale, spatiale et dans bien d'autres secteurs.

D'un autre côté, depuis plusieurs décennies, la qualité de l'environnement se dégrade. Les activités de l'Homme sont à l'origine de cette dégradation. Et aujourd'hui, on associe de plus en plus souvent au mot « *environnement* » celui de « *pollution* ». Il est donc crucial de prendre en compte les effets des activités humaines sur l'environnement. C'est dans ce cadre que les constructeurs ont pensé qu'il serait intéressant d'envisager le remplacement des fibres synthétiques par des fibres naturelles qui sont biodégradables et dont les ressources sont renouvelables.

Par ailleurs, les fibres de certaines plantes sont très employées dans de nombreux secteurs à savoir celui de l'artisanat. On peut citer les fibres extraites du sisal, du raphia,...

Concernant le bambou qui est aussi une plante fibreuse connue depuis des siècles à cause de ses multiples propriétés, ses fibres sont quant à elles moins célèbres. Toutefois, le sisal et le bambou sont des plantes écologiques par excellence puisqu'elles absorbent plus de CO₂ qu'elles n'en dégagent. Donc, pour élargir leur domaine d'utilisation, il serait juste de connaître si les fibres de ces plantes pourraient aussi servir de renforts à des matériaux composites.

Cependant, l'élément de base d'un composite à renfort fibreux est le pli. Alors, pour contribuer à l'étude du comportement élastique d'un composite à fibres végétales, l'étude de celui d'un pli ayant comme renfort ce type de fibres est nécessaire. Par conséquent, ce travail se portera sur la détermination des caractéristiques élastiques des plis unidirectionnels renforcés de fibres longues de sisal et de bambou. Et dans cette étude, la matrice utilisée sera la résine polyester puisque c'est l'une des résines les moins chères du marché.

Par ailleurs, pour connaître le comportement élastique d'un pli, l'essentiel est de s'acquiescer des valeurs des constantes élastiques de ce dernier, qui sont obtenues par des essais mécaniques et couramment utilisées dans la pratique. Mais la réalisation de ces essais demande des dispositifs expérimentaux sophistiqués pour obtenir des résultats fiables. Donc, la conception d'un logiciel pouvant estimer et prévoir les valeurs des constantes élastiques d'un pli en tenant compte de plusieurs paramètres tels que la teneur en masse des fibres est nécessaire.

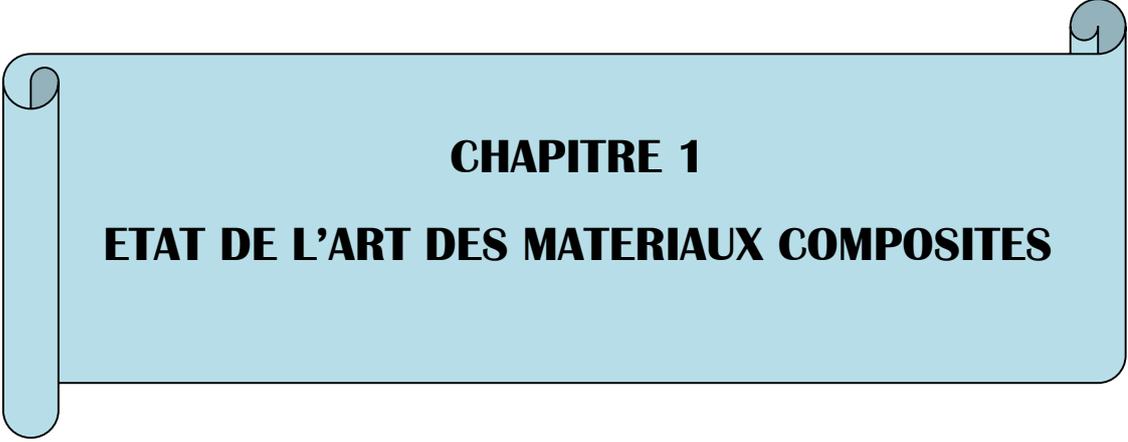
Ce travail de mémoire de fin d'études est alors intitulé :

**« *ETUDE ET EVALUATION THEORIQUE DES CONSTANTES ELASTIQUES
DES PLS UNIDIRECTIONNELS SISAL/POLYESTER ET BAMBOU/POLYESTER* ».**

Et étant donnés les travaux à faire, ce mémoire sera structuré en six chapitres.

- Le premier chapitre traitera tout d'abord l'état de l'art des matériaux composites pour mieux comprendre le monde des composites en général.
- Le deuxième chapitre sera consacré aux fibres naturelles et à leur place dans le domaine des composites.
- Des détails concernant le sisal et le bambou seront donnés dans le troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre parlera des méthodes utilisées pour déterminer les caractéristiques d'un pli de composite unidirectionnel à fibres longues.
- L'utilisation du logiciel à concevoir et les résultats obtenus seront dans le cinquième chapitre.
- Dans le sixième chapitre, les impacts positifs et négatifs des matériaux étudiés sur l'environnement seront cités.

Et pour terminer, une conclusion sera faite.



CHAPITRE 1
ETAT DE L'ART DES MATERIAUX COMPOSITES

1-1- GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

1-1-1- DEFINITION

Un *matériau composite* est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles appartenant parfois à des classes distinctes, dans le but d'obtenir un seul matériau dont les propriétés sont supérieures à celles de chacun des constituants.

C'est un matériau hétérogène et anisotrope.

1-1-2- HISTORIQUE

Tout au long de l'histoire, les humains ont employé des matériaux de type composite.

Vers 1500 ans avant Jésus Christ, Les Egyptiens utilisaient déjà le *torchis* qui est un mélange de terre argileuse et de pailles pour la fabrication des briques et des poteries. En plus de ses propriétés d'isolation thermique et phonique, ce matériau composite écologique et très résistant était déjà employé en construction.



Photo 1-1 : Torchis

Source : [52]

Le *bois* fut également l'un des premiers matériaux composites naturels utilisés. Vers les années 1200, l'âme des arcs Mongols était faite en bois.



Photo 1-2 : Arc Mongol

Source : [20]

L'utilisation industrielle des fibres synthétiques a commencé au début du XX^{ème} siècle.

En 1935, la société canadienne Owens Corning a lancé la première fibre de verre et en 1936, des résines polyester insaturées ont été brevetées en raison de leurs propriétés de durcissement.

En 1953, les fibres de verre imprégnées de résine ont déjà trouvé leur place dans la fabrication de la carrosserie de la voiture *Corvette C1* de marque américaine Chevrolet.



Photo 1-3 : La Corvette C1

Source : [24]

Les fibres naturelles ont quasiment été abandonnées dans l'industrie dès la découverte des fibres synthétiques qui sont moins sensibles à l'humidité.

Le souci de dégager actuellement une image plus écologique et de réaliser des gains de masse et d'énergie conduit à un renouveau de l'utilisation des fibres naturelles. Ce sont les constructeurs automobiles qui se sont engagés les premiers [47].

1-1-3- INTERETS DE L'UTILISATION DES COMPOSITES

L'allègement des structures est sans contexte l'un des arguments majeurs de l'utilisation des matériaux composites. En effet, ils possèdent une faible densité (comprise généralement entre 1 et 2) comparée à celle des métaux (acier : 7,8, aluminium : 2,7).

Contrairement aux métaux, les composites à fibre organique ne sont pas corrodables. Par conséquent, ils produisent des économies en termes de coût de maintenance.

Les matériaux composites ne favorisent pas la propagation de la chaleur et permettent l'amélioration de l'isolation thermique.

Ils sont également plus faciles à mettre en œuvre ce qui permet à l'ingénieur créatif d'avoir la possibilité de concevoir et réaliser des pièces de formes complexes et de grandes dimensions (coques de bateau, ...).

1-1-4- CONSTITUANTS D'UN MATERIAU COMPOSITE

Un matériau composite est principalement constitué de deux phases différentes appelées « **renforts** » et « **matrice** ».

Les renforts et la matrice doivent être parfaitement liés pour n'avoir ni glissement ni séparation entre ces deux constituants car les caractéristiques mécaniques d'une structure composite dépendent en partie de l'interface entre ces derniers.

1-1-4-1- RENFORT

Le renfort ou matériau renforçant ou encore phase discontinue du composite est l'un des constituants de base du matériau. Armature, squelette, il apporte l'essentiel des propriétés mécaniques de ce dernier telles que la résistance et la rigidité.

Les renforts se présentent généralement sous forme de fibres ou de particules.

 Les différents types de renforts

Le renfort est souvent de nature filamenteuse : fibres organiques ou inorganiques.

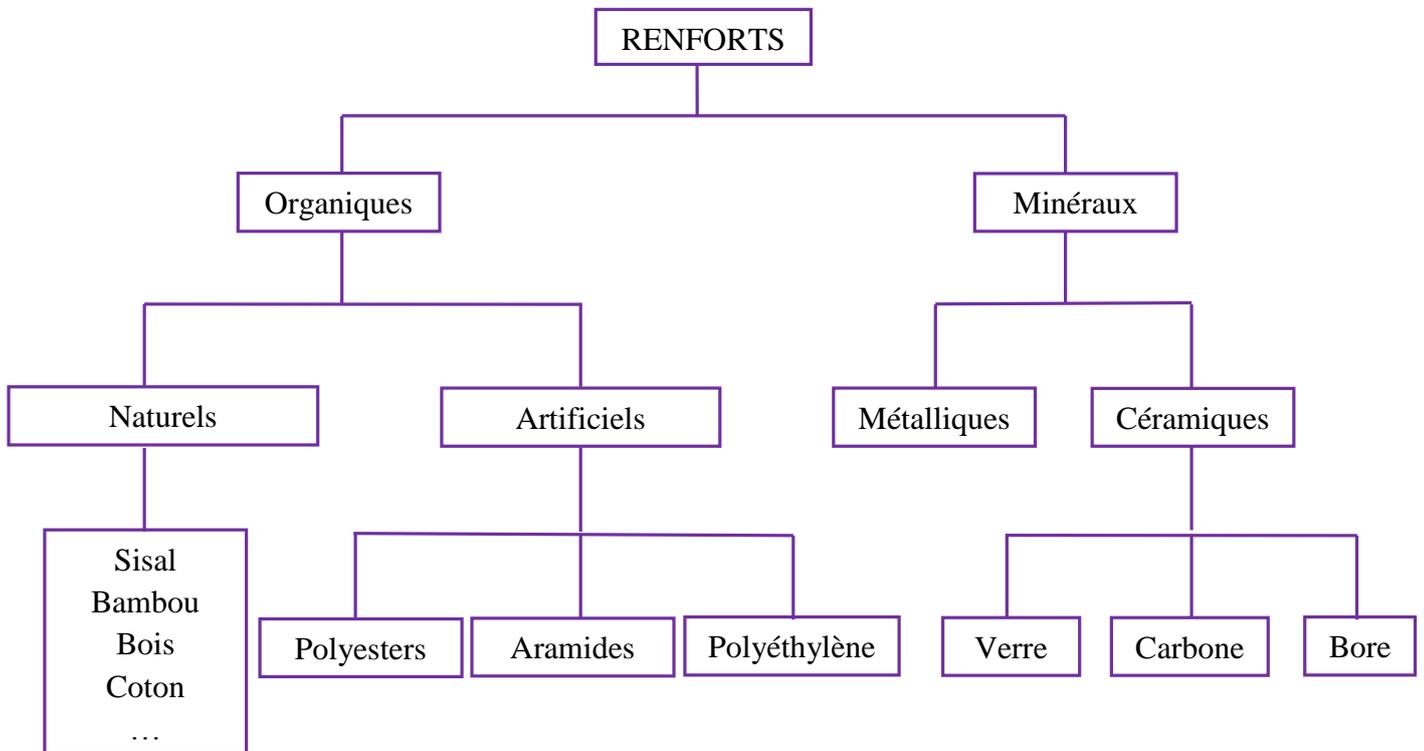


Figure 1-1 : Différents types de renforts

Source :[7]

Les fibres les plus courantes sont:

- Les fibres de verre

C'est l'un des types de fibres les plus utilisées actuellement en raison de son coût de production qui est peu élevé. On les trouve dans la construction des bâtiments, des bateaux et dans diverses applications structurelles peu chargées.

- Les fibres de carbone

Les fibres de carbone possèdent une meilleure rigidité et une plus grande légèreté par rapport aux fibres de verre (*tableau 1-1*) d'où leur utilisation dans l'aéronautique, le spatial ainsi que dans les sports et loisirs de compétitions (Formule 1, mâts de bateaux,...).

Le prix de ces fibres reste encore relativement élevé.

- Les fibres d'aramide (Kevlar)

Ces fibres qui sont plus résistantes aux chocs et plus tenaces que le carbone trouvent leur utilisation, entre autres, dans la confection des gilets pare-balles et autres protections balistiques ainsi que dans les réservoirs souples de carburant en Formule 1.

- Les fibres végétales

Les fibres végétales qui sont peu coûteuses et renouvelables commencent à faire leur apparition sur certaines pièces peu sollicitées mécaniquement. Ces fibres ont quand même de bonnes propriétés mécaniques.

Tableau 1-1 : Caractéristiques mécaniques de quelques renforts

RENFORTS	Masse volumique [kg.m ⁻³]	Module d'élasticité longitudinale [MPa]	Module de cisaillement [MPa]	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture en traction [MPa]	Allongement à la rupture [%]
Verre E	2 600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5
Verre R	2 500	86 000	-	0.2	3 200	4
Carbone HM	1 800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6
Carbone HR	1 750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3
Kevlar	1 450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3

1-1-4-2- MATRICE

La matrice ou phase continue d'un matériau composite est un liant assurant la cohésion de la structure et la transmission des efforts vers les renforts. Elle protège également ces derniers vis-à-vis des diverses agressions extérieures et permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé.

Les différents types de matrices

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée par la figure suivante :

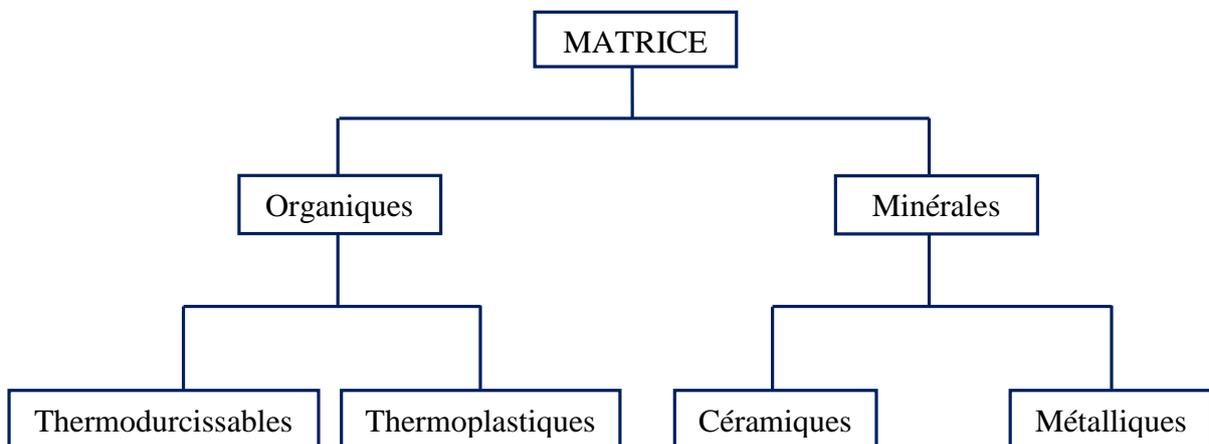


Figure 1-2 : Différents types de matrices

Quelques fois, on classe les matériaux composites en fonction de la nature de la matrice. On peut citer :

- ✿ les composites à matrice organique (CMO) qui constituent actuellement les volumes les plus importants à l'échelle industrielle
- ✿ les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique)
- ✿ les composites à matrice métallique (CMM) utilisés pour quelques applications spécialisées.

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant un matériau composite est une résine polymère. Il en existe principalement deux types à savoir les thermodurcissables et les thermoplastiques.

a- Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées, elles se présentent sous forme liquide visqueuse. La forme désirée est obtenue en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur entraînant une solidification. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques par exemple) et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables.

Les résines les plus performantes ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-après.

Tableau 1-2 : Caractéristiques mécaniques de quelques résines thermodurcissables

RESINES Thermodurcissables	Masse volumique [kg.m ⁻³]	Module d'élasticité longitudinale [MPa]	Module de cisaillement [MPa]	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture en traction [MPa]	Allongement à la rupture [%]
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5
Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2
Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5
Polyamide	1400	4000 à 19000	1100	0.35	70	1

b- Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles (*tableau 1-3*), elles se présentent sous forme solide (granulés, plaques...). C'est en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement que l'on peut leur donner la forme voulue. Les polychlorures de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques.

Tableau 1-3 : Caractéristiques mécaniques de quelques résines thermoplastiques

Matrices Thermoplastiques	Masse volumique [kg.m ⁻³]	Module d'élasticité longitudinale [MPa]	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture en traction [MPa]	Allongement à la rupture [%]
Polypropylène	900	1200	0.4	30	20 à 400
Polyamide	1100	2000	0.35	70	200
Polyéther-imide	1150	3300	-	105	60
Polyéther-sulfone	1350	3000	-	85	60

c- Comparaison des deux types de résines

- **Structure moléculaire**

Les thermodurcissables sont des molécules en forme de réseaux tridimensionnels, maintenus par des liaisons chimiques de forte énergie établies de manière irréversible lors de la polymérisation.

Les thermoplastiques sont constitués de longues molécules linéaires, maintenues entre elles par des liaisons physiques de faible énergie; ces liaisons se cassent lorsque le polymère est chauffé et se rétablissent lorsqu'on le refroidit, de façon réversible.

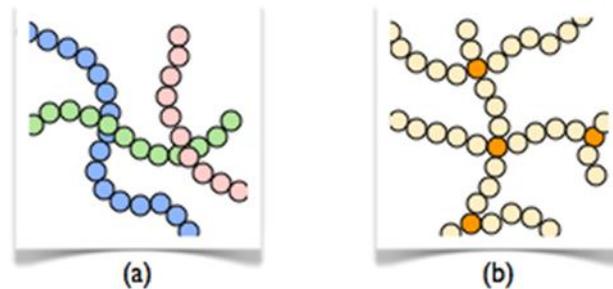


Figure 1-3 : Structures moléculaires :

(a) d'un polymère thermoplastique

(b) d'un polymère thermodurcissable

- **Propriétés**

- Les thermodurcissables sont plus rigides et plus résistants que les thermoplastiques. Cela importe peu sur les composites à fibres longues car la rigidité et la résistance proviennent essentiellement des fibres

- Les thermodurcissables sont moins ductiles que les thermoplastiques, donc ces derniers résistent mieux à la fissuration

- Les déchets thermodurcissables ne sont pas recyclables contrairement aux déchets thermoplastiques

- Les granulés thermoplastiques peuvent être stockés indéfiniment et à température ambiante, les thermodurcissables doivent être stockés au froid et pendant une durée limitée si la résine et le durcisseur sont déjà mélangés
- Les thermoplastiques doivent toujours être portés à haute température pour être mis en forme, ce qui n'est pas le cas des thermodurcissables...

De manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées que les thermoplastiques, en raison de leur plus grande facilité de mise en forme (il est plus facile d'imprégner des fibres avec un liquide qu'avec des granulés ramollis, et les températures à utiliser sont souvent plus raisonnables). Parmi les plus courantes, on peut citer les résines polyester insaturées, peu coûteuses et souvent utilisées dans les applications "grande diffusion", et les résines époxy (ou époxydes), très employées dans les applications "hautes performances".

Lors de la fabrication du matériau composite, des produits appelés « **charge** » et « **additif** » sont parfois ajoutés pour lui conférer de nouvelles propriétés afin de permettre à ce composite de remplir davantage de fonctions techniques.

Comme exemple de charge, on peut citer les *particules de silice* qui rendent la matrice plus isolante (thermiquement, électriquement et acoustiquement), et diminuent son retrait au moulage.

Des *stabilisants* sont des types d'additifs qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, aux UV ou encore à l'ozone.

1-2- ARCHITECTURE DES RENFORTS DANS UN COMPOSITE

Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites dépendent en partie de l'architecture des renforts c'est-à-dire de leurs formes géométriques et leurs orientations. Donc, il est important d'en tenir compte pour espérer obtenir un matériau optimum qui satisfera les exigences du cahier de charge.

1-2-1- GEOMETRIE DES RENFORTS

Géométriquement parlant, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les *fibres longues* dont les longueurs sont comparables aux dimensions de la pièce
- Les *fibres courtes* dont les longueurs sont faibles devant les dimensions de la pièce
- Les *particules*

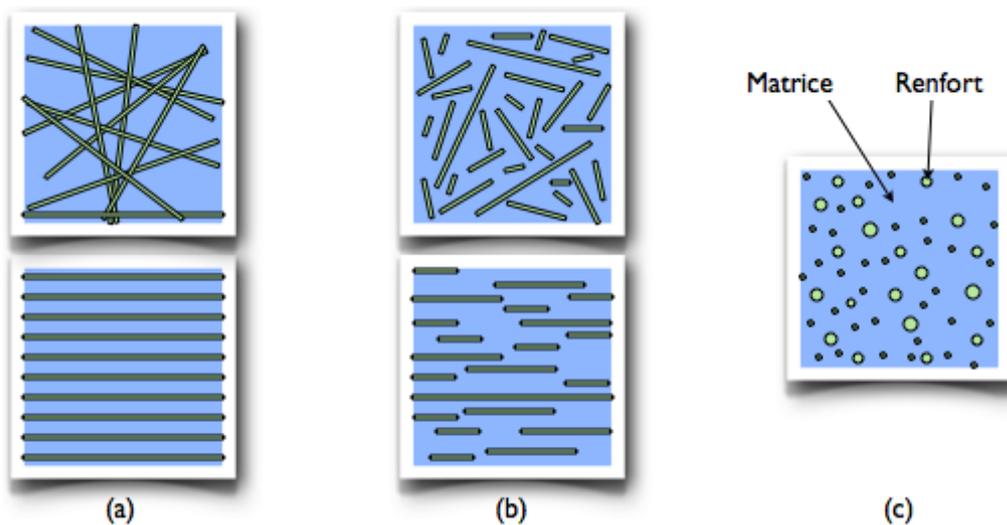


Figure 1-4 : Structures géométriques des renforts :

(a) : fibres longues

(b) : fibres courtes

(c) : particules

Les composites à fibres longues présentent un meilleur comportement mécanique que les composites à fibres courtes ou à particules, du moins dans les directions renforcées par les fibres. Ainsi, pour des applications structurelles, c'est-à-dire des pièces devant résister à des efforts importants, on utilise généralement des fibres longues, dont on adapte l'orientation aux sollicitations subies par la pièce. En revanche, pour des applications non structurelles, on utilise généralement des fibres courtes ou des particules, dont le coût de mise en œuvre est moins élevé.

1-2-2- DISPOSITION DES RENFORTS

La disposition des *renforts fibreux* dans un composite dépend du contexte de l'utilisation de ce dernier et des propriétés recherchées.

Les fibres peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.

Donc, il existe différentes façons d'aménager les fibres dans un matériau composite mais nous ne verrons ici que les dispositions les plus courantes.

1-2-2-1- Disposition unidirectionnelle

On entend par renfort unidirectionnel, un ensemble de fibres disposées parallèlement dans une direction donnée.

Depuis les 50 dernières années, les matériaux composites à renforts continus unidirectionnels (composites unidirectionnels) connaissent une popularité grandissante au sein de plusieurs industries de pointe. Dans l'industrie aéronautique, par exemple, de plus en plus de composantes structurales (ailes, fuselage, etc.) normalement fabriquées en aluminium sont remplacées par leurs équivalents en matériaux composites unidirectionnels.

Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres, d'où l'importance de son étude.

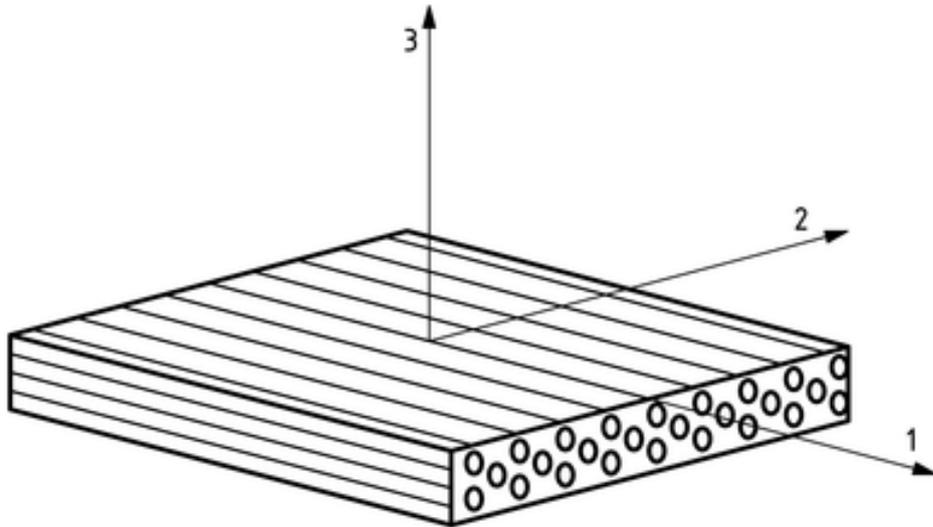


Figure 1-5 : Composite unidirectionnel

1-2-2-2- Disposition bidirectionnelle

Comme son nom l'indique, un renfort bidirectionnel est un ensemble de fibres disposées dans deux directions différentes afin de servir de renfort à un matériau composite.

Le *tissu* est un renfort bidirectionnel. Il se caractérise par l'entrecroisement, de façon perpendiculaire de stratifils (ensemble de fils de bases parallèles assemblées sans torsion).

Un fil de base est obtenu par juxtaposition des fibres (parallèles ou retordues).

L'armure est le mode d'entrecroisement définissant un tissu ; il joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique du composite.

Il existe principalement trois types d'armures : Toile ou taffetas, Sergé et Satin.

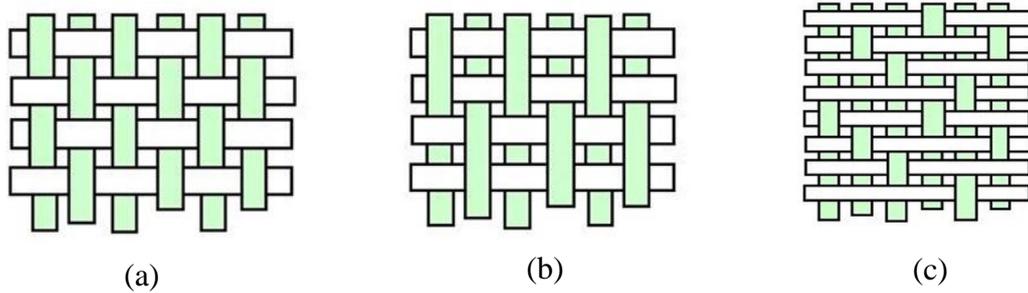


Figure 1-6 : Les différents types d'armure

(a) Armure toile

(b) Armure sergé

(c) Armure satin

Source :[40]

1-2-2-3- Disposition multidirectionnelle

Il existe différents types de tissages employés pour obtenir des renforts multidirectionnels. On peut citer comme exemples :

- Les tresses

Ce sont des tissages cylindriques avec des entrecroisements réguliers des fils. On les utilise très souvent dans la fabrication des pales d'avions.

- Le Tissage 3D

Il consiste à orienter les mèches dans plusieurs axes non coplanaires.

On a aussi les tissages 2.5D, triaxial,...

1-2-2-4- Disposition aléatoire

On parle ici des mats.

Les mats sont des nappes de fils continus ou coupés, disposés dans un plan suivant une direction aléatoire. Ils sont maintenus ensemble par un liant (une émulsion par exemple). Les mats sont en quelques sortes isotropes à cause de l'absence d'orientation préférentielle des fibres.

Ils offrent une bonne déformabilité pour le renforcement des formes complexes et sont énormément utilisés en raison de leur masse surfacique (100 à 600 g/m²) et de leurs faibles coûts.

Les mats sont par exemple utilisés dans les structures légères avec faibles exigences structurales et dans les peaux des panneaux sandwich.



Photo 1-4 : Mat de fibres de verre

Source : [39]

1-3- STRUCTURE DES MATERIAUX COMPOSITES

Il existe diverses structures de matériaux composites.

1-3-1- Les plis

Le pli représente l'élément de base de la structure composite. C'est pour cette raison qu'il est important d'en faire une étude approfondie.

On qualifie couramment du nom de pli le semi-produit composite présenté sous forme quasi-bidimensionnelle.



Photo 1-5 : Plis en fibres de Carbone/Epoxy

Les différents types de plis sont caractérisés par la disposition des renforts.

- **Le pli unidirectionnel**

Il comprend plusieurs fibres parallèles, entre autre alignées dans une seule direction, qui se noient dans la matrice.

La direction parallèle aux fibres est nommée la direction longitudinale. La direction perpendiculaire aux fibres est la direction transversale.

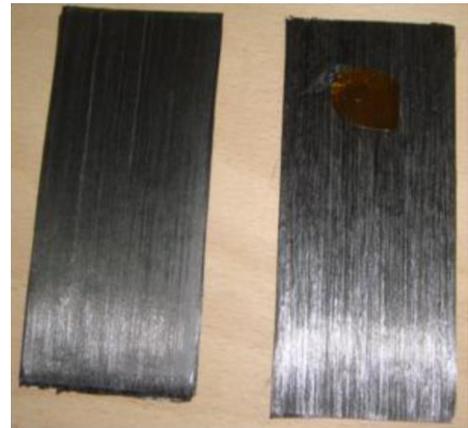
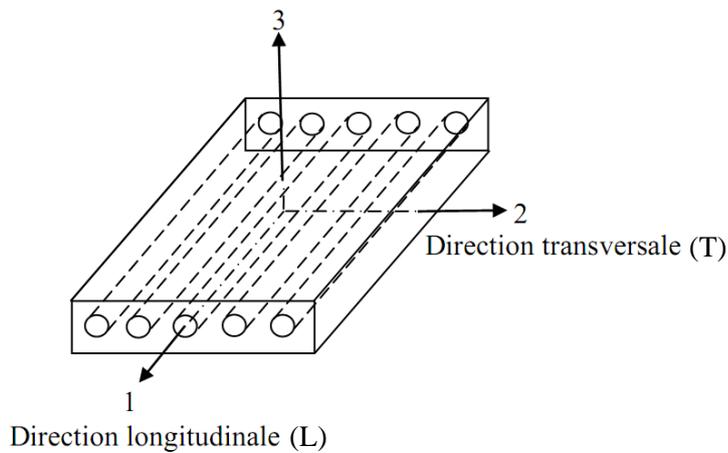


Figure 1-7 : Pli unidirectionnel

Photo 1-6 : Pli unidirectionnel à fibres de Carbone/Epoxy

- **le pli tissé** : les fibres de renfort forment un tissu
- **le pli mat** : les fibres sont disposées en mat

Cette étude se focalisera plus sur les plis à fibres longues unidirectionnelles.

A partir de plusieurs plis, s'obtient une autre structure appelée « *stratifié* ».

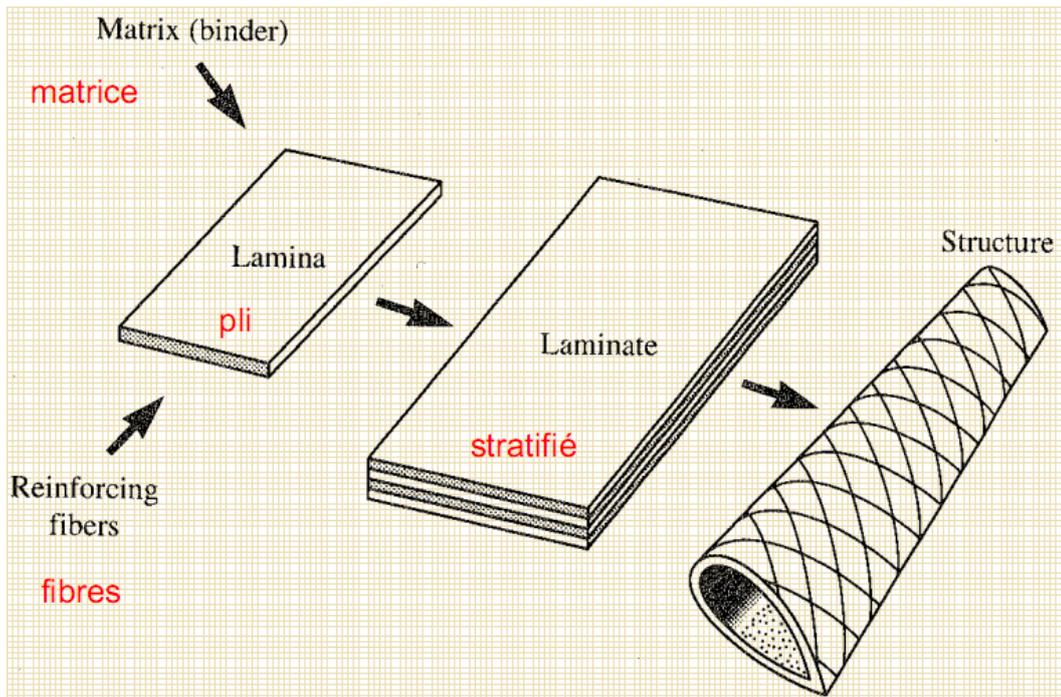


Figure 1-8 : Etapes d'obtention d'une structure stratifiée

1-3-2- Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de plis ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

Le choix de l'empilement et surtout des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

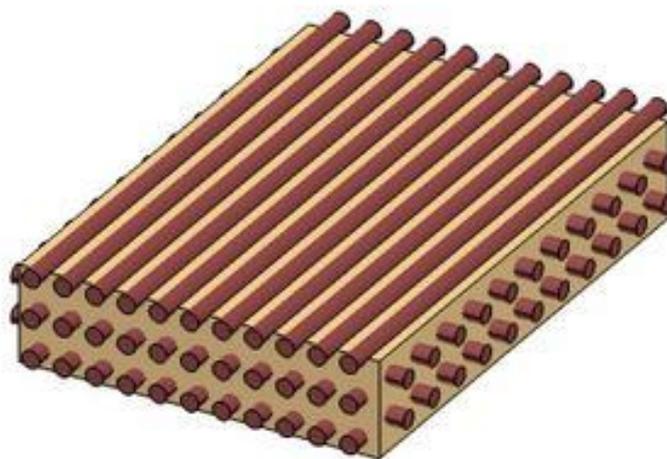


Figure 1-9 : Exemple de stratifié

1-3-3- Sandwichs

Ce sont des matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté.



Figure 1-10: Structure en sandwich

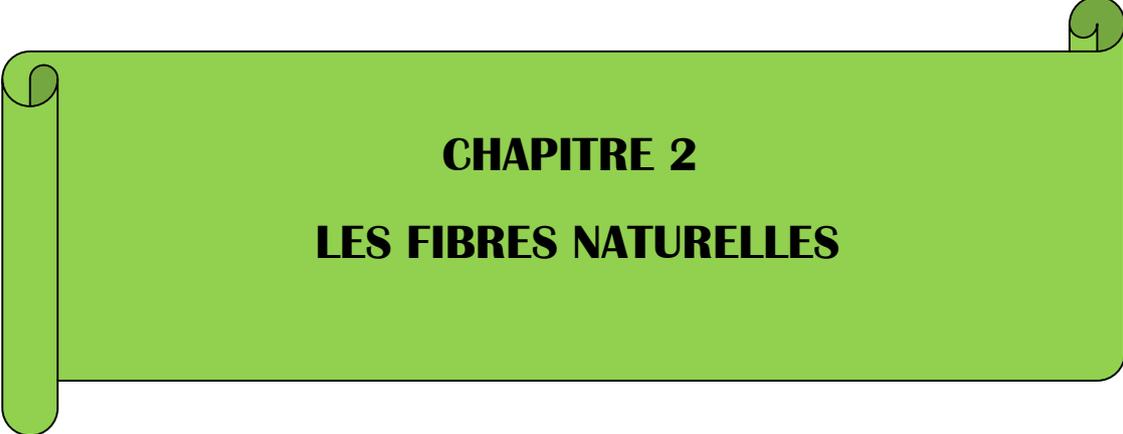
Le matériau sandwich est un excellent isolant thermique.

➤ L'utilisation des matériaux composites remonte depuis des siècles. Ces dernières années, ils semblent être de plus en plus employés par l'homme dans presque tous les domaines (spatial, aéronautique, bâtiment, construction mécanique, santé, sport,...) à cause de leurs caractéristiques et leurs propriétés fulgurantes qui commencent à surpasser celles des métaux.

Cependant, les caractéristiques mécaniques d'un composite dépendent en générale de la compétence du constructeur de choisir les fibres de renfort et la matrice selon les exigences demandées pour obtenir une résistance optimale, de la méthode de mise en œuvre, de son architecture de renforcement et du type de structure voulue.

Après diverses études, les chercheurs ont constatés que plus les fibres de renforcement sont longues plus le matériau devient résistant, du moins dans la direction de ces fibres.

Par ailleurs, Il est à noter que la conception d'un matériau composite ne peut se faire qu'en vue d'un produit final et que le pli est l'élément de base de toute structure composite.

A green scroll graphic with a black outline, featuring a vertical strip on the left side and a small circular detail at the top right corner. The text is centered within the scroll.

CHAPITRE 2
LES FIBRES NATURELLES

L'idée de remplacer les fibres de synthèse, comme les fibres de verre qui dominent sur le marché, n'est pas nouvelle. Mais dans un contexte dit de développement durable où le recours à des ressources renouvelables est encouragé, ce remplacement est désormais considéré comme une voie sérieuse et prometteuse.

En effet, dans le but d'atténuer la dégradation de l'environnement, les industriels cherchent actuellement de nouveaux matériaux pouvant remplacer les matériaux ordinaires issus de ressources non renouvelables, encore très utilisés de nos jours.

2-1- GENERALITES SUR LES FIBRES NATURELLES

Les fibres naturelles peuvent être définies comme étant des fibres dont les ressources sont renouvelables, naturellement biodégradables, neutres quant aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère et ne demandant en général que peu d'énergie pour être produites.

2-1-1- DOMAINES D'UTILISATION

L'utilisation des fibres naturelles est en expansion dans le domaine du bâtiment afin de remplacer les matériaux d'isolation classiques par des matériaux naturels. Dans ce cas, ces fibres s'utilisent seules ou en combinaison avec d'autres matériaux afin de créer des matériaux possédant une résistance thermique plus élevée.

Dans d'autres secteurs, les fibres naturelles sont associées à des polymères pour obtenir des matériaux composites dont les applications sont croissantes dans le domaine de l'électronique, de l'automobile, etc. Le but premier de l'utilisation des fibres naturelles est dans ce cas le renforcement mécanique du polymère.

2-1-2- TYPES DE FIBRES NATURELLES

Le terme « fibre naturelle » regroupe plusieurs types de fibres qui se différencient en fonction de l'origine de la fibre. Ainsi, une fibre naturelle peut-être d'origine **minérale**, **animale** ou encore **végétale**.

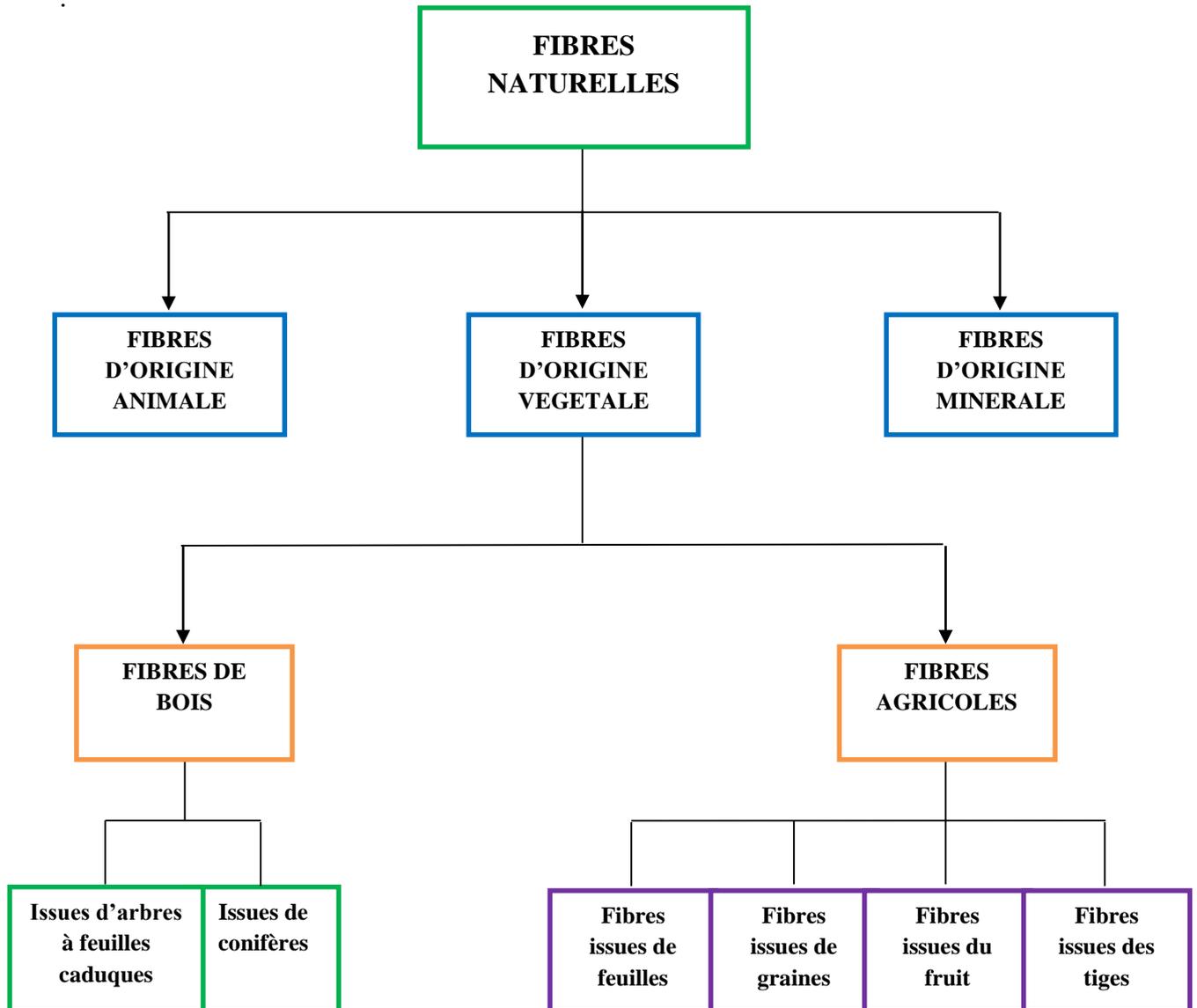


Figure 2-1 : Classification des fibres naturelles

(Selon la norme DIN 60 001)

2-1-3-FIBRES D'ORIGINE ANIMALE

Les fibres naturelles issues d'animaux se divisent en trois principaux groupes : **soie naturelle, laine et poils.**

2-1-3-1- SOIE NATURELLE

➤ Soie des chenilles

Pour protéger leur métamorphose, les chenilles de papillons (par exemple le **bombyx** du mûrier) tissent autour d'elles un cocon à l'aide de leur glande séricigène (glande à soie). Ce cocon, une fois dévidé, donne le fil de soie.



Photo 2-1 : *Bombyx* du murier

Source : [32]



Photo 2-2 : Cocon du bombyx

Source : [23]

À l'œil nu, la fibre est un fil très long, entre 700 et 1500 m, et très fin, à l'aspect brillant et doux. La soie, comme la laine, contient un mélange de protéines notamment la fibroïne et la séricine qui représentent respectivement 65 % et 25 % du poids total, mais aussi de l'eau et des sels minéraux. La fibroïne est la soie proprement dite, les autres éléments étant plus ou moins complètement éliminés au cours de la préparation de la fibre.

Cette fibre a une résistance élevée, du même ordre de grandeur que celle d'un fil d'acier à diamètre égal. Son élasticité est très grande, ce qui donne des tissus presque infroissables. La soie est un bon isolant thermique.

➤ Soie d'araignées

Les araignées produisent un fil constitué lui aussi de protéines. Les types et la nature des soies sont divers et dépendent du type d'araignée. Les soies d'araignée ont différentes fonctions telles que la capture de proies, la reproduction et la détection des vibrations.



Photo 2-3 : Araignée

Source : [37]



Photo 2-4 : Toile d'araignée

Source : [34]

Toutefois, les chercheurs commencent à s'intéresser aux performances mécaniques de cette soie pour la confection de textile et le renforcement des matériaux composites. Les performances mécaniques des soies d'araignée combinent résistance en traction, compression et ténacité.

Pour les soies naturelles, la valeur du module d'Young et celle de la contrainte de rupture peuvent atteindre respectivement 60 GPa et 2900 MPa. Par ailleurs, l'allongement à la rupture de ce type de soie peut aller jusqu'à 200 %.

Cet allongement à la rupture en traction très important explique que, pour l'absorption d'énergie mécanique, les soies d'araignée sont inégalées dans le monde des fibres synthétiques ou naturelles.

2-1-3-2- LAINE

La laine est un matériau d'origine animale constituée de fibres kératiniques provenant d'ovins.

La laine est l'une des principales fibres animales les plus utilisées au monde dans le domaine du textile; la structure de ses protéines lui confère des qualités uniques, une résilience et une élasticité exceptionnelles, avec lesquelles les fibres synthétiques ne peuvent rivaliser.

Son observation à l'œil nu montre une forme frisée et élastique de couleur variable, du blanc au brun en passant par le jaune. Sa longueur varie entre 3 et 30 cm.

La laine présente une grande aptitude à la filature, car les fibres adhèrent bien les unes aux autres, de même qu'elle se mélange bien avec d'autres types de fibres. Son toucher est rêche et elle possède un remarquable pouvoir isolant.

La laine est produite dans une centaine de pays.

Tableau 2-1 : Liste des principaux pays producteurs de laine (Mai 2015)

PAYS	PRODUCTION ANNUELLE (t)
Australie	520 000
Chine	325 000
Nouvelle-Zélande	229 600
Iran	75 000
Royaume-Uni	60 000
Argentine	60 000
Inde	51 400
Turquie	46 500
Soudan	46 000
Afrique du Sud	44 156
Pakistan	39 700
Syrie	29 800
Espagne	29 624
Kazakhstan	26 600
Indonésie	24 400
France	22 000
Algérie	20 000

Source : [26]

Selon le pays et la région, elle est produite par de petits paysans ou de grosses exploitations commerciales. Les deux tiers de la production sont destinés à la fabrication de vêtements et le tiers restant à celle de tapis et de revêtements, les usages industriels, comme l'isolation, comptant pour 5% environ.



Photo 2-5 : Rouleau de laine de mouton pour l'isolation thermique

Source : [33]

Le mot « *laine* » est aussi employé, par extension, pour désigner d'autres matériaux, souvent fabriqués par synthèse chimique ou d'origine minérale, présentant des caractéristiques communes, comme leur pouvoir isolant ou leur apparence, et utilisés par exemple dans le bâtiment : laine de verre et laine de roche.

2-1-3-3- POILS

Les poils proviennent de divers animaux de la famille des camélidés (comme le chameau, le lama, l'alpaga, le guanaco, la vigogne), du yack,... . Le guanaco est protégé. Il ne peut donc pas être tondu, mais on peut récolter ses poils lorsqu'il mue.

Les fibres animales présentent des propriétés spécifiques importantes telles que les propriétés mécaniques (résistance et rigidité), la biodégradabilité, leur origine renouvelable, etc.

Malgré ces avantages, les fibres animales ne sont pas beaucoup utilisées comme renfort dans les matériaux composites à cause de leur prix élevé et leur faible production.

2-1-4- FIBRES D'ORIGINE MINERALE

La fusion puis le fibrage de divers minéraux permet de produire des fibres minérales. Les renforts d'origine minérale les plus courants sont le basalte et l'amiante.

2-1-4-1- Le basalte

Le mot **basalte** vient du latin « **basaltes** », lui-même dérivé d'un terme éthiopien signifiant « roche noire ». Le basalte est mélanocrate à holomélanocrate (sombre à très sombre). Il a une structure microlithique, est composé essentiellement de **plagioclases** (50 %), de **pyroxènes** (25 à 40 %), d'**olivine** (10 à 25 %) et de 2 à 3 % de **magnétite**.

Le basalte, constituant principal de la couche supérieure de la croûte océanique, est une roche volcanique issue d'un magma refroidi rapidement au contact de l'eau ou de l'air. Il résulte de la fusion partielle, au niveau de la **low velocity zone**, d'une pyrolite hydratée.



Photo 2-6 : Basalte à l'état brut

Source : [30]

Les **fibres de basalte** présentent des avantages importants par rapport aux autres fibres tels que :

- une très bonne résistance à la corrosion, aux rayonnements UV
- une bonne résistance au feu
- un matériau inerte, non toxique, non cancérigène
- une température d'utilisation allant jusqu'à 820 °C
- une contrainte et déformation à la rupture supérieures à celles de la fibre de verre
- un module d'Young élevé (89 GPa)
- une très bonne résistance aux produits chimiques : acides forts, bases, solvants
- un prix compétitif par rapport à la fibre de verre.

De par ces propriétés, les premières applications visées sont la protection anti-feu notamment pour l'ameublement, la construction, les câbles, etc.

Ces fibres sont également utilisées comme renforts dans les matériaux composites. Les producteurs mettent en avant leur résistance aux agressions chimiques et leur résistance en

traction qui est supérieure d'environ 20 % à celle de la fibre de verre. Les fibres de basalte possèdent également une bonne mouillabilité et n'absorbent pas l'humidité. Les renforts peuvent se présenter sous différentes formes : tissés et non-tissés, tissus 3D et triaxiaux, tresses et filaments coupés. Ces caractéristiques pourraient leur ouvrir des applications dans les sports et loisirs ou dans l'automobile.



Photo 2-7 : Fibres de *basalte*

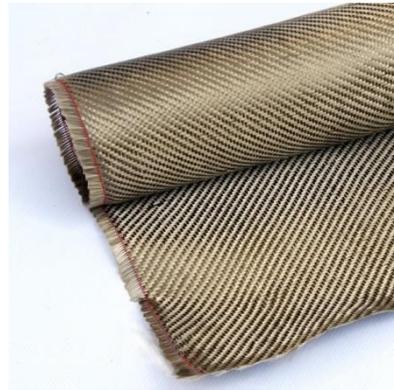


Photo 2-8 : Tissu de *basalte*

Source : [42]

2-1-4-2- L'amiante

L'*amiante* ou « *asbeste* » est un terme désignant certains minéraux à texture fibreuse utilisés dans l'industrie. C'est un hydrosilicate de magnésium contenant du fer, du sodium ou du calcium selon la variété.

On distingue deux familles d'amiante à savoir :

- 🌈 l'*amiante blanc* ou *chrysotile* (groupe des *serpentes*)
- 🌈 l'*amiante bleu* ou *crocidolite* (groupe des *amphiboles*).

L'*amiante* a attiré l'attention de certains industriels à la fin du XIX^e siècle pour sa flexibilité, sa résistance à la chaleur, au feu, à la tension et aux agressions chimiques.

Elle est généralement associée aux résines phénoliques en raison d'un bon accrochage. Elle peut être employée en combinaison avec les fibres de verre dans le but de diminuer le coût.

Bien que les fibres d'*amiante* présentent de nombreux avantages, elles posent de sérieux problèmes d'hygiène et de sécurité. En effet, les fibrilles d'*amiante* favorisent l'action de produit cancérogène sur l'homme, elle est donc aujourd'hui soumise à une réglementation très stricte.



Photo 2-9 : L'amiante à l'état brut

Source : [21]



Photo 2-10 : Fibres d'amiante

Source : [36]

2-1-5- FIBRES D'ORIGINE VEGETALE

Par définition, une fibre végétale est une expansion cellulaire filiforme, principalement composée de *celluloses*, d'*hémicelluloses* et de *lignines*. Elle peut être soit isolée, soit regroupée avec d'autres fibres pour former un faisceau de fibres [50].

Les fibres végétales sont actuellement les fibres naturelles les plus utilisées pour la fabrication des composites.

Ces fibres peuvent être issues de différentes parties de la plante : des *graines* (poils séminaux), de la *tige* ou du *tronc* (fibres libériennes), des *fruits* (enveloppe) ou des *feuilles*.

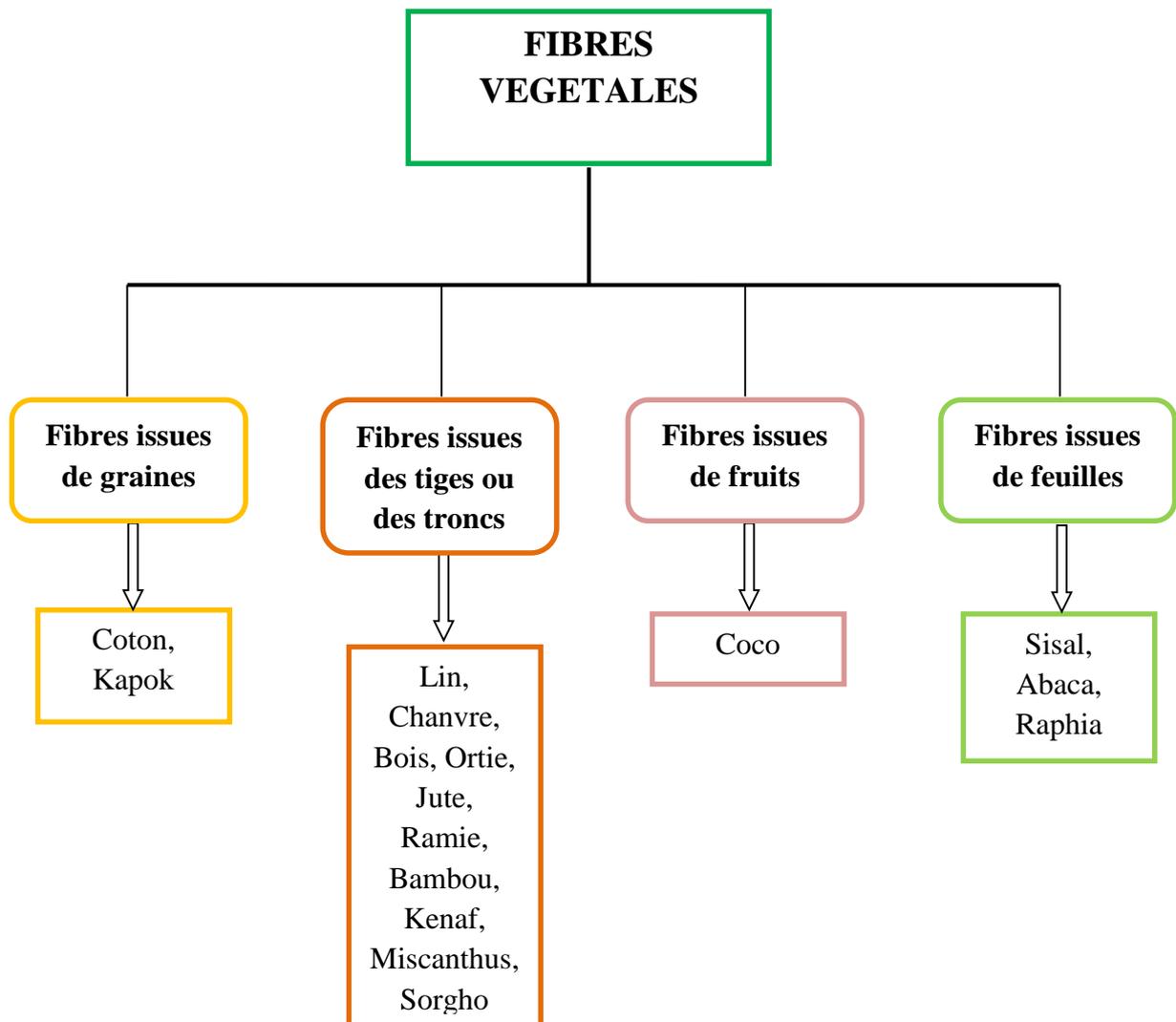


Figure. 2-2: Classification des fibres végétales

Source :[25]

2-1-5-1- Principaux composants

La *cellulose*, la *lignine* et l'*hémicellulose* sont les principaux composants chimiques des fibres végétales. La teneur de chaque composant dépend de l'âge, de l'origine et des conditions d'extraction des fibres.

a- Cellulose

La *cellulose* est en relation directe avec les propriétés mécaniques. Plus le taux en *cellulose* dans une fibre est élevé, plus cette dernière possèdera de meilleures propriétés mécaniques. En effet, elle est le constituant chimique qui, dans la structure moléculaire, contribue le plus à la résistance et à la stabilité de la paroi végétale et donc des fibres.

b- Lignine

La *lignine* a comme fonction principale d'assurer la rigidité de la plante pour qu'elle atteigne une hauteur conséquente et de protéger cette dernière contre l'attaque des organismes pathogènes. Elle confère aussi aux fibres leur résistance à la compression

c- Hémicellulose

L'*hémicellulose* constitue avec la *cellulose* un composite dont elle est la matrice.

Tableau 2-2 : Composants chimiques de certaines fibres

	Coton	Jute	Lin	Ramie	Sisal	Fonction dans la paroi
Cellulose (%)	82,7	64,4	64,1	68,6	65,8	Fibre
Hémicellulose (%)	5,7	12,0	16,7	13,1	12,0	Matrice
Pectine (%)	-	0,2	1,8	1,9	0,8	Protection
Lignine (%)	-	11,8	2,0	0,6	9,9	Matrice
Extractifs (%)	1,0	1,1	3,9	5,5	1,2	Protection
Wax (%)	0,6	0,5	1,5	0,3	0,3	Protection
Eau (%)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	Protection

2-1-5-2- Propriétés des fibres végétales**a- Propriétés mécaniques**

Chaque type de fibre végétale possède ses propres propriétés mécaniques car ces dernières dépendent en grande partie de la teneur de chaque constituant de la fibre à savoir la *cellulose*, la *lignine* et l'*hémicellulose*.

Tableau 2-3 : Propriétés mécaniques de quelques fibres végétales

Matériau	Contrainte à la rupture (MPa)	Déformation (%)	Masse volumique (g/cm³)
Lin	500 - 900	1,5 - 4,0	1,45
Chanvre	350 - 800	1,6 - 4,0	1,48
Kenaf	400 - 700	1,7 - 2,1	1,3
Jute	300 - 700	1,2 - 3,0	1,3
Bambou	500 - 740	≈2,0	1,4
Sisal	300 - 500	2,0 - 5,0	1,5
Coco	150 - 180	20 - 40	1,2

Source : [5]

2-1-5-3- Avantages et inconvénients

Les fibres végétales combinent plusieurs avantages. Elles constituent tout d'abord une ressource biodégradable locale. Elles présentent un faible coût : jusqu'à neuf fois moins chères que les fibres de verre et jusqu'à cinq cent fois moins chères que les fibres de carbone. Elles sont issues des parties renouvelables des plantes. Elles présentent un faible impact environnemental (six fois moins énergivore que les fibres de verre et douze fois moins que les fibres de carbone). En effet, outre l'avantage direct de réduire l'impact négatif sur l'environnement au stade de la fabrication, un composite renforcé par des fibres naturelles peut également contribuer au respect de l'environnement grâce à son poids inférieur et à la consommation réduite de carburant des véhicules de transport qui en résulte. Bien sûr, les fibres végétales possèdent une faible densité ce qui leur confère des propriétés spécifiques (grandeurs physiques ramenées à la densité) comparables à celles des fibres de verre dont elles constituent une alternative.

Les fibres végétales présentent aussi un certain nombre d'inconvénients qui découlent principalement du caractère naturel de ces fibres. Par conséquent, elles affichent une forte variabilité des propriétés pour une même espèce en fonction de plusieurs facteurs comme le climat, l'âge de la plante, etc. A titre d'exemple, la teneur en *cellulose*, principal composant d'une fibre végétale dont la quantité influe sur les propriétés de la fibre, varie en fonction de l'âge de la plante [15].

Tableau 2-4 : Principaux avantages et inconvénients de l'utilisation des fibres végétales

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Faible coût	Absorption d'eau
Propriétés mécaniques spécifiques importantes	Faible stabilité dimensionnelle
Biodégradable	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
Non abrasif pour les outillages	Fibres anisotropes
Neutre pour l'émission de CO₂	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de l'âge et du climat
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Pas de résidus après incinération	Renfort discontinu
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Pauvre adhérence avec les polymères
Bonne isolation thermique et acoustique	
Ressource renouvelable	

Source : [15]

2-1-5-4- Disponibilité en fibres végétales

a. Disponibilité en fibres végétales au niveau mondial

Les fibres végétales sont en effet disponibles dans presque tous les pays du monde et varient évidemment d'un pays à l'autre en fonction du climat.

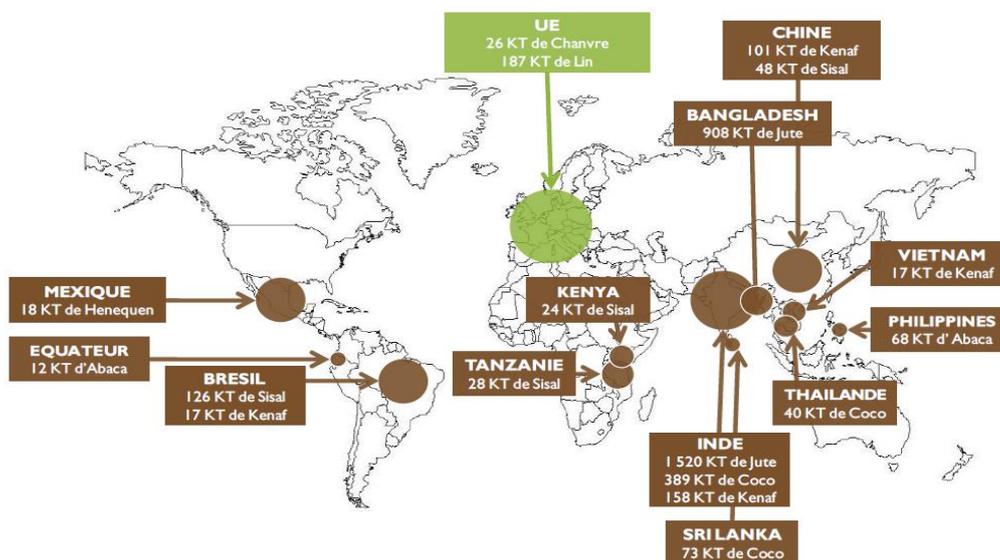


Figure 2-3: Répartition mondiale annuelle de la production de fibres végétales hors coton et bois (JEC Composites)

Source : [5]

La production mondiale annuelle de fibres végétales en kilotonne (kt) est actuellement de l'ordre de 6200 kt hors coton (22 600 kt) et bois (chiffres moyens 2001-2008).

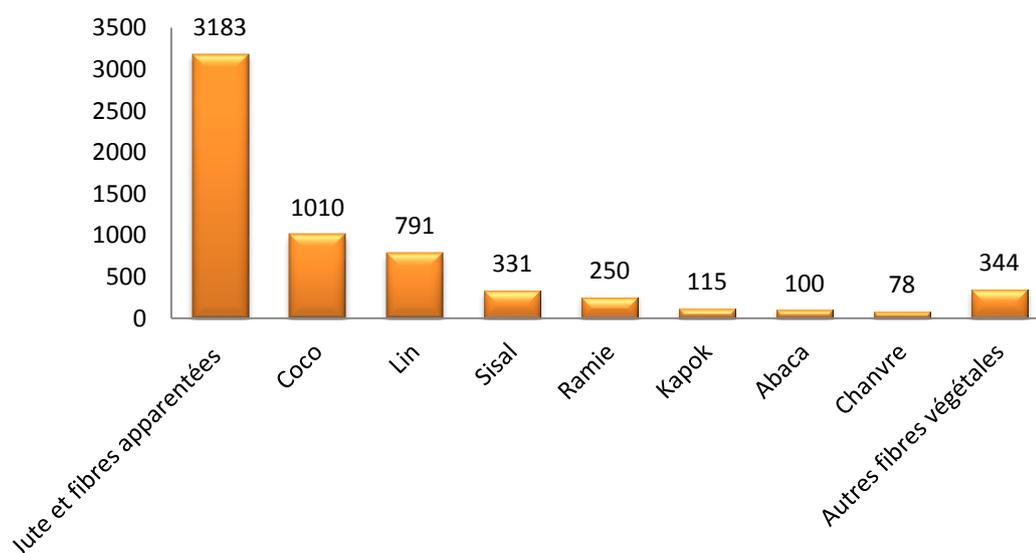


Figure 2-4: Production mondiale de fibres végétales hors coton et bois (2001-2008)

Source : [5]

La moitié du gisement (hors coton et bois) est issue de la culture du jute et de ses fibres apparentées. Puis vient le coco et le lin avec respectivement 16 et 13% de la production mondiale.

b. Disponibilité en fibres végétales à Madagascar

A Madagascar, l'utilisation des fibres végétales en tant que renforts des matériaux composites n'est pas encore très répandue. Toutefois ce type de fibres est très utilisé dans le domaine de l'artisanat à savoir les fibres de sisal, de raphia, etc. Leur production se localise dans le Nord du pays, à l'Est, à l'Ouest et sur les Hauts plateaux.

Selon la FAO (Food and Agriculture Organization) et le FIDA (Fond International de Développement Agricole) en 2008, on estime à environ 2 500 tonnes la quantité de fibres végétales transformée par l'ensemble des artisans de la région Analamanga, toutes fibres confondues. Au niveau national, on en compte plus de 6 000 tonnes et la tendance est en hausse.

➤ Conscients de la dégradation de l'environnement écologique, les chercheurs commencent à s'intéresser de nouveau aux fibres naturelles, délaissées il y a quelques années à cause de l'avènement des fibres synthétiques.

Bien qu'elles tiennent toujours une place importante dans le domaine de l'artisanat et du textile, elles commencent aussi à jouer des rôles importants dans la fabrication des matériaux composites.

En effet, sachant que les fibres naturelles sont biodégradables, neutres aux émissions de CO₂ dans l'atmosphère et d'origine des ressources renouvelables, certaines de ces fibres possèdent également des propriétés très intéressantes.

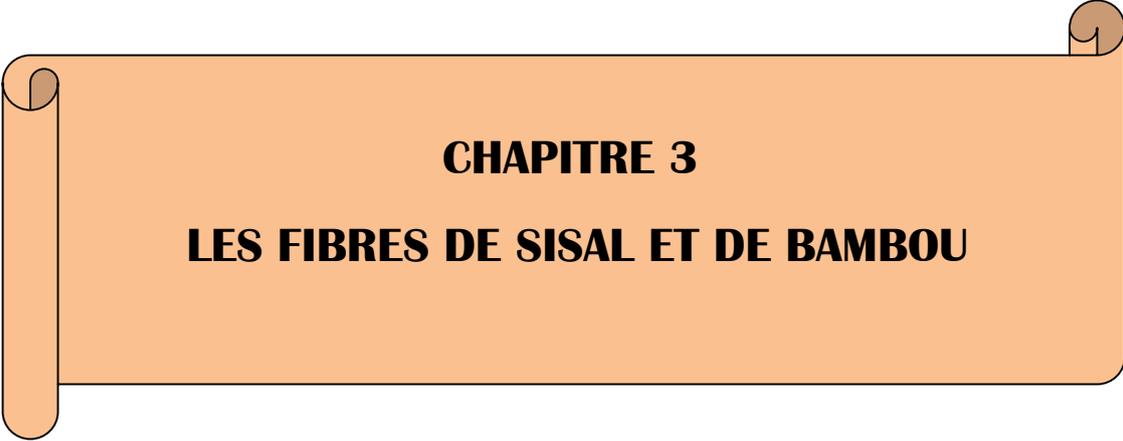
Par exemple les fibres de basalte, qui sont d'origine minérale, ont une résistance au feu très élevée. La soie d'araignée, quant à elle, d'origine animale, peut s'allonger jusqu'à 200% ce qui attire l'attention des chercheurs.

Cependant, certaines fibres naturelles présentent encore quelques lacunes : les fibres animales par exemple, malgré leurs avantages, ne sont pas beaucoup utilisées comme renfort dans les

matériaux composites à cause de leur prix élevé et leur faible production. Les fibres d'amiante, qui sont des fibres minérales, sont cancérigènes.

L'utilisation des fibres végétales est croissante dans presque tous les domaines à savoir les secteurs du bâtiment, des transports et des loisirs. Elles peuvent être employées en association avec un matériau polymère pour ainsi former un matériau composite à base de fibres végétales. Dans ce cas, le but premier recherché est d'obtenir un matériau léger possédant des propriétés mécaniques spécifiques liées au renfort (les fibres).

Etant données les propriétés intéressantes des fibres d'origine végétale qui ont un avenir prometteur en ce qui concerne leur utilisation, un chapitre sera consacré au sisal et au bambou.



CHAPITRE 3
LES FIBRES DE SISAL ET DE BAMBOU

3-1- SISAL

Le sisal est une plante originaire de l'Est du Mexique, de la famille des « *Agavaceae* », dont le nom botanique est « *Agave sisalana* ». Il pousse toute l'année dans des climats chauds et arides souvent impropres aux autres cultures et s'accommode de la plupart des types de sols sauf ceux des sols argileux, très salins et humides. Sa culture est relativement simple car elle résiste bien aux maladies et nécessite peu d'intrants.

Chaque plante peut produire pendant sa vie productive, qui peut atteindre 12 ans, de 180 à 240 feuilles selon la situation géographique, l'altitude et la pluviométrie. Chaque feuille contient une moyenne d'environ 1000 fibres dont la longueur varie de 60 à 110 cm. Par ailleurs, une fois planté, la première coupe du sisal a lieu après 2 ou 3 ans, puis à 6 ou 12 mois d'intervalle.

Le rendement moyen en fibres séchées s'établit à une tonne par hectare. En Afrique de l'Est, ce chiffre peut atteindre quatre tonnes par hectare [27].



Photo 3-1 : Fibres de sisal

Source : [49]

3-1-1- LOCALISATION DE LA PLANTE

Le sisal est cultivé pour sa fibre dans plusieurs pays: Afrique du Sud, Angola, Brésil, Chine, Cuba, Haïti, Indonésie, Kenya, Mozambique, Mexique, Tanzanie, Thaïlande et Madagascar.

La production mondiale de fibre de sisal en 2007 équivaut à 240 000 tonnes dont le Brésil est le plus grand producteur au monde avec 113 000 tonnes.

Tableau 3.1 : Production mondiale de fibre de sisal en 2007 (en tonne)

Brésil	113 300
Tanzanie	36 900
Chine	34 000
Kenya	27 600
Madagascar	9 100
Haïti	2 200
Afrique du Sud	1 600
TOTAL	240 700

Source: [45]

La production de fibres de sisal à Madagascar équivaut à 10 000 tonnes par an en moyenne, soit près de 3% du besoin mondial. La Chine est le principal acheteur du sisal malgache avec environ 50% des exportations. Elle est suivie par le Maroc (26%), l'Inde (7%) et l'Espagne (6%).

Les sociétés comme la Société des Plantations de Sisal du Mandrare (SPSM) et la Société Agricole de Madagascar (SAM) cultivent du sisal afin d'exporter des fibres et leur capacité de production annuelle combinée est estimée à environ 3 000 tonnes par an.

Le sisal de Madagascar est réputé pour sa qualité. En effet, de mai à novembre 2013, il y avait eu une demande croissante pour ses fibres sur le marché mondial car d'après le rapport du marché de Sisal de Wilhelm Clasen, la production de Brésil en fibres de sisal manquait de qualité supérieure et les acheteurs venant de Kenya et de Tanzanie ont augmenté leur demande

en sisal provenant de la Grande Ile. De même, des sociétés espagnoles s'intéressent aux fibres de sisal de Madagascar.

Cependant, la production Malgache est insuffisante à cause de la faible surface cultivée [49].



Photo 3-2 : Plantation du sisal à Berenty (Madagascar)

Source : [46]

3-1-2- DOMAINES D'UTILISATION

Le sisal produit, par ses feuilles, des fibres qui ont été traditionnellement utilisées pour la confection des ficelles, cordes et nattes. Cependant, le marché mondial du sisal n'a cessé de se contracter depuis qu'il est apparu des produits synthétiques remplaçant les fibres naturelles, et en particulier depuis que le polypropylène est utilisé pour la fabrication de ficelles et de cordages. Toutefois, compte tenu de l'intérêt croissant pour les produits naturels, renouvelables et biodégradables, les échanges de sisal sont en passe de connaître un nouvel essor avec la remise à l'honneur des utilisations traditionnelles et l'apparition de nouvelles applications [14].



Photo 3-3 : Cordes en sisal

Source : [31]

En effet, les fibres de sisal sont maintenant utilisées comme agents de renforcement (à la place de l'amiante et des fibres de verre) dans les cordes revêtues de fils métalliques, les pâtes à papier de spécialité et le plâtre. Elles sont également employées comme isolants ou fibres ornementales dans les tapis, les revêtements muraux et le macramé. Ces fibres entrent aussi dans la fabrication de filtres et de géotextiles écologiques utilisés en génie civil.



Photo 3-4 : Exemple de macramé en sisal

Source : [35]

Par ailleurs, du fait de sa faible densité et de ses bonnes propriétés d'adhérence, le sisal recèle un intéressant potentiel pour le renforcement des composites polymères (thermoplastiques et thermodurcissables). L'utilisation des composites contenant du sisal gagne en popularité dans les composants d'automobiles (carrosserie, intérieur,...) [43] et le mobilier. Les fibres de sisal peuvent aussi être employées en tant que complément des fibres de verre. D'un autre côté, elles demeurent les matériaux de prédilection pour les cibles à fléchettes.

D'après des études au niveau international faites sous la conduite de la FAO, les déchets de la production de sisal peuvent aussi être utilisés comme aliments du bétail, comme engrais, mais aussi pour produire du biogaz comme l'ont fait le fond commun pour les produits de base, l'ONUDI et l'industrie tanzanienne du sisal en créant la première usine de traitement des résidus du sisal pour produire du biogaz, de l'électricité et des engrais. Et compte tenu de l'intérêt croissant porté au recyclage, on a donc encore une autre raison de dire que le sisal pourrait offrir des perspectives prometteuses dans la conception de nouveau matériau composite et notamment dans l'industrie du papier [44]. En effet, la biomasse du sisal contient une forte proportion de cellulose et sa pulpe peut donc être utilisée comme substitut de la fibre de bois pour épaissir le papier et le carton. Ses qualités d'absorption et sa résistance au pliage en font un intrant de

qualité pour les produits de papier [9]. Au cours des deux dernières décennies, les fibres de sisal ont également été utilisées comme renforts dans le ciment.

De plus, les déchets issus de l'extraction des fibres sont aujourd'hui transformés pour en extraire du jus de sisal, jus entrant dans la composition des produits pharmaceutiques.

Le sisal a donc un avenir prometteur car il respecte également l'environnement.

Ce message a été largement diffusé en 2009 à l'occasion de l'Année internationale des fibres naturelles [50].

3-1-3- QUELQUES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES FIBRES

Le tableau suivant résume les valeurs de quelques caractéristiques mécaniques d'une fibre de sisal.

Tableau 3-2 : Quelques propriétés mécaniques d'une fibre de sisal

Module d'élasticité longitudinale E_{f1} (GPa)	25
Module d'élasticité transversale E_{f2} (GPa)	3.85
Module de cisaillement G_{f12} (GPa)	1.1
Contrainte à la rupture (MPa)	300 - 500
Déformation relative (%)	2,0 - 5,0

D'après ce tableau, il y a une grande différence entre la valeur du module d'élasticité longitudinale et celle du module d'élasticité transversale, ce qui montre bien que les fibres de sisal sont fortement anisotropes.

En général, la masse volumique des fibres de sisal est environ égale à **1.5 g/cm³**.

Il est possible d'améliorer les propriétés mécaniques de ces fibres en leur faisant subir des traitements chimiques.

3-2- BAMBOU

Le mot « bambou » provient du malais "*mambu*" qui signifie "*bois indispensable*". Mais c'est en réalité une plante ligneuse, une « herbe géante » qui fait partie de la famille des Graminées à savoir des Poacées, comme le blé, le maïs ou les herbes à gazon. Dans le monde, on en recense environ plus de 1300 espèces.



Photo 3-5 : Bambou

Source : [41]

Le bambou nécessite l'abondance du soleil. Et c'est pour cette raison qu'il se voit pousser à l'état sauvage dans les ravins, le long des berges des rivières et dans des endroits à climat de mousson comme l'Asie du Sud tropicale, les collines tempérées de l'Himalaya et la moitié nord tropicale de l'Amérique du Sud.

Il se plaît dans la plupart des sols, depuis les sols pauvres en matière organique jusqu'à ceux riches en minéraux, mais préfère les sols légers et frais, neutre à tendance acide. Cependant, la plupart prospèrent bien en terrain légèrement alcalin et supportent le calcaire si ce dernier n'est pas trop dominant. Il résiste aussi assez bien à la sécheresse, à moins qu'elle soit exceptionnellement longue, et aux inondations. Par ailleurs, il vaut mieux éviter les sols trop argileux.

Le bambou est une plante à croissance rapide. Il peut déjà atteindre sa taille adulte (35 mètres pour certaines espèces) au bout de 100 jours et sa maturité après 3 à 6 ans à partir du moment où il commence à sortir de la terre. A ce stade, les fibres sont plus fortes et il y a moins d'humidité dans le chaume.

3-2-1- LOCALISATION DE LA PLANTE

Le bambou a fait son apparition il y a environ 200 millions d'années. Il est originaire de Chine. Cependant, aujourd'hui, le bambou pousse naturellement dans les zones tropicales, subtropicales et tempérées de toutes les régions du monde, à des altitudes variables, (jusqu'à 3000 m dans l'Himalaya), à l'exclusion de l'Europe et de l'Asie occidentale.

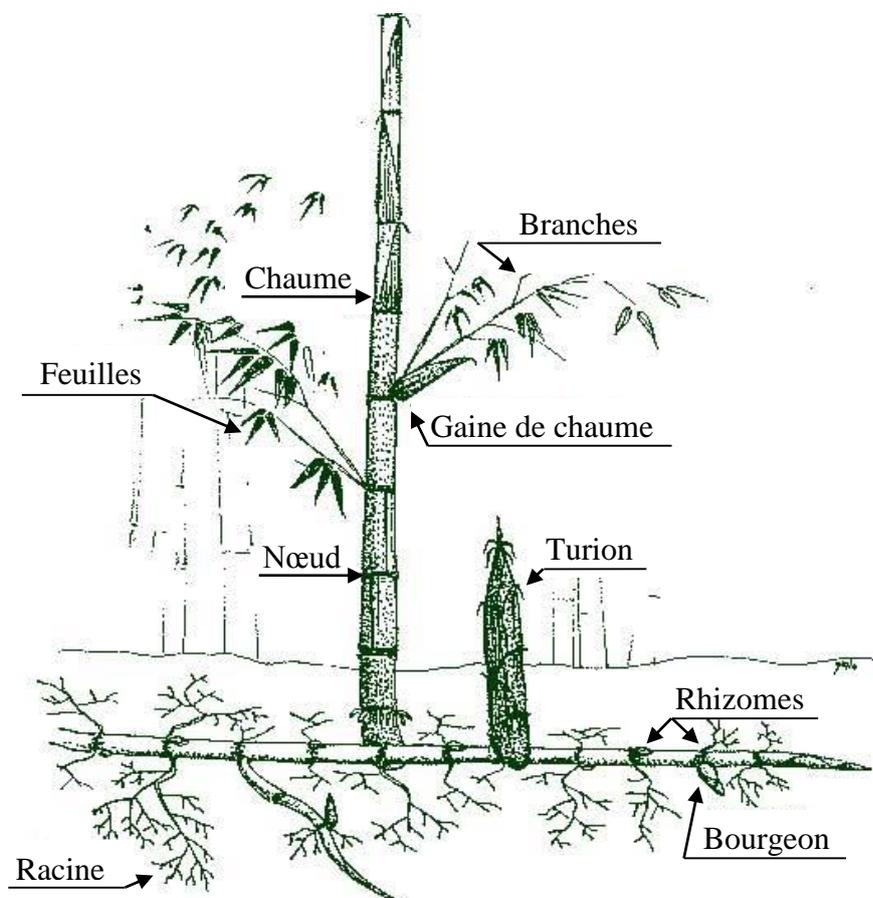
Tableau 3-3 : Distribution mondiale du bambou

Localisation	Espèces
Asie	Environ 600
Amériques	Environ 400
Madagascar	35
Afrique	5
Pacifique	4
Australie	3
total	Plus de 1000

Source : [22]

Comme en Chine, le bambou pousse aussi très bien à Madagascar. Sur la côte Est de l'île, il est courant de voir les gens l'utiliser pour transporter de l'eau [16]. Selon des recherches effectuées, Madagascar possède environ 35 espèces de bambou endémiques.

La Grande Ile a alors de grandes ressources inexploitées de bambou car jusqu'à présent, son utilisation et sa valorisation sont limitées à l'artisanat [50].

3-2-2- ANATOMIE DE LA PLANTE**Figure 3-1: Anatomie de la plante**

Source : [29]

L'image ci-dessus nous montre les différentes parties du bambou.

a) Le chaume

Aussi appelé « *canne* », le chaume est un tube creux, cloisonné aux nœuds. La cicatrice visible aux nœuds est la trace de la gaine des feuilles tombées. Le chaume est constitué de 55% de cellules de stockage, de 35% de fibres pour la résistance, de 10% de tissus conducteurs d'eau et de sucre. Les plus gros spécimens de bambou peuvent atteindre 35 mètres de haut pour un diamètre d'environ 30 cm ; il pousse en se dépliant à la façon d'un télescope. Les chaumes se balancent aux vents forts mais ils se cassent rarement.



Photo 3-6: Types de chaumes

Source : [48]

b) Rhizome

Tous les bambous ont des tiges souterraines, appelées rhizomes, à partir desquelles se développent les racines et la partie aérienne du bambou (les turions).

c) Turion

Cette jeune pousse, encore tendre, sort du sol sans branches ni feuilles. C'est cette partie du bambou qui est comestible.

d) Gaine du chaume

La gaine est une enveloppe végétale qui protège la jeune pousse de bambou durant sa croissance. Pour la plupart des bambous, cette gaine tombera lorsque la canne sera assez résistante.

f) Le feuillage

Il existe des feuilles striées de couleurs différentes qui poussent sur les bambous. Elles peuvent être détruites par la sécheresse ou le froid et se renouvellent régulièrement.

g) Entre-nœuds

C'est la partie de la tige située entre deux nœuds.

Par ailleurs, l'intérieur de la tige du bambou est creux. Et cette morphologie creuse du bambou associée à ses nœuds réparties uniformément le long de la tige accroît sa résistance (souplesse) latérale et sa résistance à la flexion.

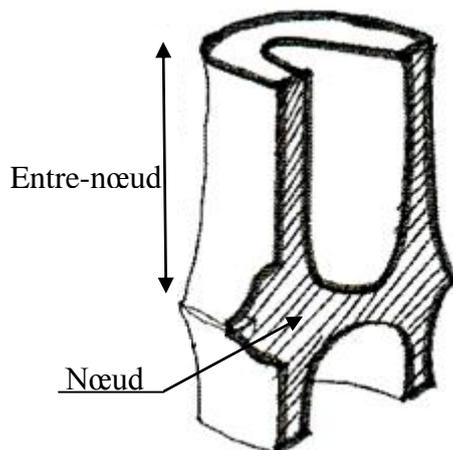


Figure 3-2: Section d'une tige de bambou

Source : [28]

La structure lignifiée du bambou est très similaire à celle du bois. Mais contrairement à ce dernier, dont le noyau est le plus dur, pour le bambou, c'est sa partie externe qui l'est.

3-2-3- DOMAINES D'UTILISATION

Etroitement lié à tous les aspects du quotidien, notamment en Asie, le bambou fait partie intégrante de la vie et de la culture. Prodigant abri, chaleur, musique et vêtements, cette graminée (herbe) intervient dans de très nombreux usages (médicinal, architectural, nutritif, musical, ...).

Dans le domaine du composite, les tiges de bambou sont parfois utilisées pour contribuer à la fortification du béton armé et ses fibres, extraites du chaume, peuvent être employées en tant que renfort de matériaux.



Photo 3-7: Fibres de bambou

Source : [22]

3-2-4- CARACTERISTIQUES DES BAMBOUS

Intéressé par les facteurs pouvant influencer les propriétés mécaniques du bambou, *Raj* [14] souligne que la partie externe des tiges de bambou est au moins deux fois plus résistante que la partie interne. Des valeurs rapportées par certains chercheurs indiquent que le module de rupture en flexion du bambou se situe à 140 MPa pour l'extérieur tandis qu'il est de 52 MPa pour l'intérieur. Ces valeurs en tension sont de 210 à 250MPa et 150 à 200 MPa pour l'extérieur et l'intérieur respectivement.

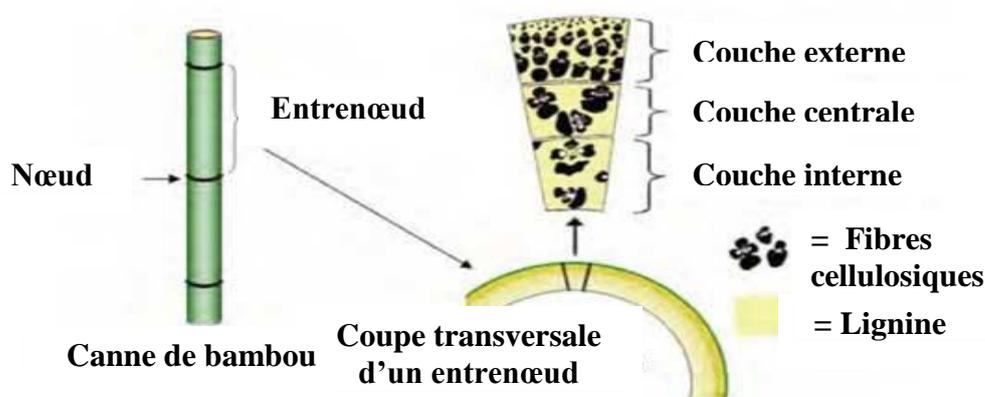


Figure 3-3: Coupe transversale d'un entrenœud

Source : [53]

D'autre part, la résistance des fibres du bambou augmente à partir du nœud jusqu'au centre de la partie inter-nodale. Et la distribution de ces fibres est plus uniforme à la base de la tige qu'au sommet. C'est donc à cet endroit que la paroi est la plus épaisse donc la plus résistante. Ceci peut s'expliquer par le fait que le bambou doit supporter son propre poids.

La coupe révèle une différence de masse volumique dans l'épaisseur, celle-ci varie de 0.5 à 0.8 g/cm³ de l'intérieur vers l'extérieur du tronçon. De même, au sein d'un pied de bambou, elle croît de bas en haut. La masse volumique informe sur la quantité de fibres contenue dans la section, donc, sur la résistance du matériau.

Par ailleurs, c'est le taux d'humidité qui définira la qualité des propriétés mécaniques du bambou donc de ses fibres. Il a été observé que les propriétés mécaniques sont optimales lorsque les tiges, après séchage, ont un taux d'humidité situé entre 15 et 20%. De façon générale, *Hidalgo* [12] affirme que plus les conditions d'humidité sont élevées, moins les propriétés du bambou sont bonnes. Tout comme le bois, le bambou subit un retrait dû au séchage après que l'on ait coupé la tige.

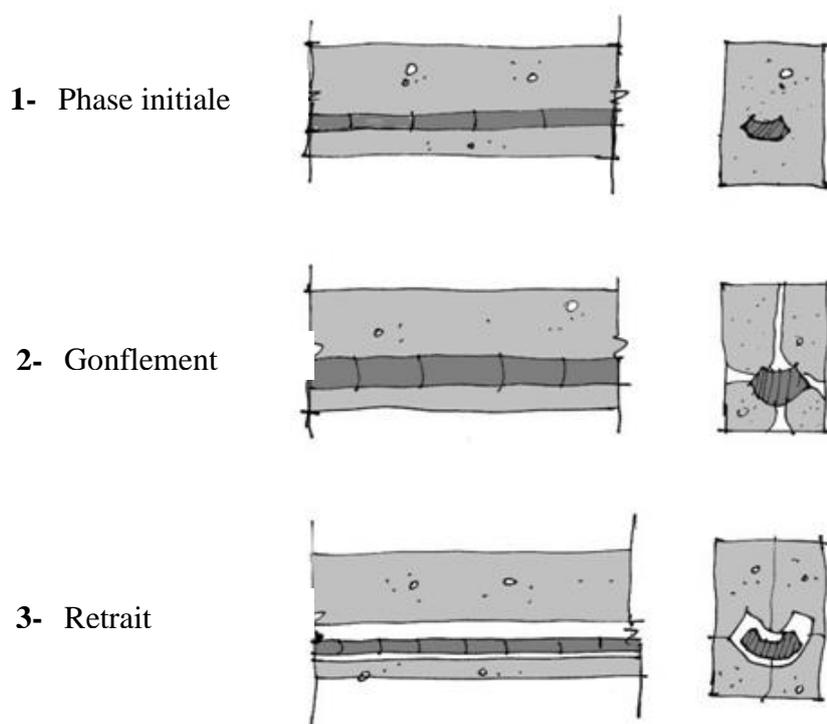


Figure 3-4: Phénomène d'instabilité dimensionnelle du bambou dans le béton

Source : [53]

Ferreira et Al. [8] ont mesuré la stabilité dimensionnelle du bambou en menant des essais sur des tiges différentes. Certaines tiges étaient séchées naturellement, d'autres étaient saturées d'eau et quelques-unes étaient cuites. Les résultats démontrent qu'à une augmentation des conditions d'humidité correspond une diminution des qualités physiques du bambou. Ainsi, la meilleure stabilité dimensionnelle a été obtenue pour les tiges de bambou ayant subi la cuisson.

Les recherches de *Hidalgo* [12] démontrent que l'intérieur de la tige qui représente 70% de l'épaisseur, a une texture plus douce et absorbe la plus grande quantité d'eau. Et au contraire, la partie externe qui est plus dense et représente 30% de l'épaisseur totale de la tige, absorbe une quantité minimale d'eau et offre une résistance supérieure à celle de la partie interne.

Ce qu'il faut retenir également c'est que chaque espèce de bambou a ses propres propriétés physiques et mécaniques, et la disponibilité et l'accessibilité de la matière sont donc des facteurs importants lors de la sélection d'une espèce.

Pour sa part, *Ghavami* [11] a pris en considération certaines propriétés, telle l'hygroscopicité afin de sélectionner l'espèce la plus prometteuse pour la fabrication d'armatures. Le *Bambusa Vulgaris Scard* est une espèce dont la teneur en humidité est relativement faible. Néanmoins, sa section transversale augmente de 6% après 7 jours d'immersion. *Ghavami* [10] ne conseille donc pas d'utiliser cette espèce pour la fabrication d'armatures.

Surjokusumo et *Nugroho* [18] ont comparé plusieurs espèces de bambou, tels le *Gigantochloa Apus*, et le *Dendrocalamus Asper*. Cette dernière espèce, avec ses tiges droites, a les meilleurs résultats quant à la résistance à la traction et au module de rupture.

Le « *Dendrocalamus Asper* » est une des espèces que l'on trouve à Madagascar. Il peut atteindre une hauteur de 20 à 30 mètres, ses entre-nœuds ont une longueur de 20 à 45 cm pour un diamètre de 8 à 20 cm avec une épaisseur de 11 à 35 mm. Cette espèce est très utilisée en construction à cause de sa résistance et de sa durabilité.

Le tableau suivant résume les valeurs de quelques caractéristiques mécaniques d'une fibre de bambou.

Tableau 3-4 : Quelques propriétés mécaniques d'une fibre de bambou

Module d'élasticité longitudinale E_{f1} (GPa)	39.2
Module d'élasticité transversale E_{f2} (GPa)	5.9
Module de cisaillement G_{f12} (GPa)	-
Contrainte à la rupture (MPa)	500 - 740
Déformation relative (%)	$\approx 2,0$

La masse volumique d'une fibre de bambou est environ égale à **1,4 g/cm³**.

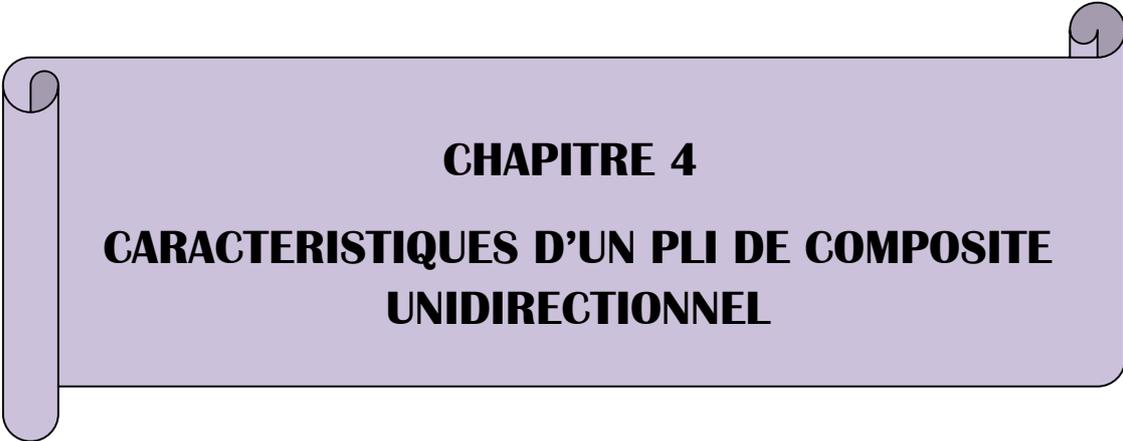
Tout comme pour la fibre de sisal et pour n'importe quelle autre fibre végétale, il est possible d'améliorer les propriétés des fibres de bambou en leur faisant subir par exemple des traitements chimiques.

Ce chapitre permet donc de déduire que :

- Le ***sisal*** est essentiellement utilisé pour ses fibres. En effet, depuis toujours, les fibres de sisal ont servi à fabriquer des cordes et ficelles, et ces dernières années, on les trouve dans d'autres domaines à savoir les domaines du génie civil, de construction automobile,...

- Le ***bambou*** est une plante dont les domaines d'utilisation sont nombreux. Il s'emploie à partir du moment où ils deviennent matures. Leurs caractéristiques mécaniques sont meilleures lorsque leur taux d'humidité est de l'ordre de 15 à 20%. Les chercheurs ont constaté, pour une section donnée, que la paroi interne du bambou est moins résistante que la paroi externe où les fibres sont plus denses.

Ces deux genres de plante donnent des fibres naturelles biodégradables. Il serait donc intéressant d'utiliser ces fibres comme renforts des matériaux composites à matrice polyester insaturée, résine la plus employée actuellement et dont les caractéristiques sont mentionnées dans le chapitre 1. La détermination et l'étude des propriétés mécaniques des plis unidirectionnels des composites ***Sisal/Polyester*** et ***Bambou/Polyester*** sont alors nécessaires pour la fabrication des composites unidirectionnels de ces deux types. C'est le but de ce travail de mémoire.



CHAPITRE 4
CARACTERISTIQUES D'UN PLI DE COMPOSITE
UNIDIRECTIONNEL

Un pli est unidirectionnel si les fibres noyées dans la matrice sont parallèles. La direction parallèle aux fibres est nommée *direction longitudinale* et celle perpendiculaire est la *direction transversale*.

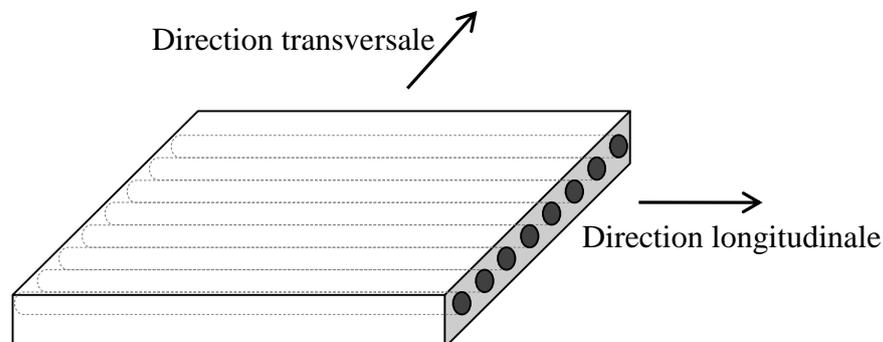


Figure 4-1 : Directions pour un pli unidirectionnel

Un stratifié est un composite obtenu par empilement de plusieurs plis. Le pli a alors un rôle important pour un stratifié. Par conséquent, il est primordial de connaître les caractéristiques d'un pli pour pouvoir déterminer celles du stratifié.

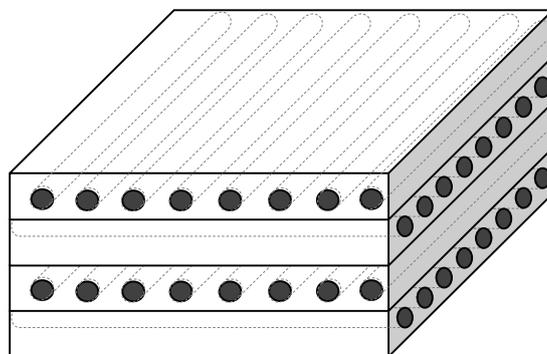


Figure 4-2 : Stratifié

Le but de ce chapitre est d'étudier les propriétés élastiques d'un pli de composite unidirectionnel dont le renfort est constitué de fibres continues orientées dans une seule direction. Cependant, les caractéristiques mécaniques d'un tel pli dépendent de celles de ses constituants et des quantités mises en jeu de ces derniers.

4-1- TENEURS EN VOLUME ET EN MASSE

Un des facteurs essentiels et nécessaires à la détermination des caractéristiques d'un matériau composite est la proportion relative de renfort et de matrice. Cette proportion est exprimée soit en teneur en volume soit en teneur en masse.

4-1-1- Teneurs en volume

La teneur en volume d'un constituant dans un matériau composite est le rapport entre le volume du constituant et celui du composite mis en jeu.

- **teneur en volume des fibres**

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (4-1)$$

- **teneur en volume de la matrice**

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (4-2)$$

- **teneur en volume des vides**

$$V_v = \frac{v_v}{v_c} \quad (4-3)$$

Avec v_f : volume des fibres

v_m : volume de la matrice

v_c : volume du composite

v_v : volume des vides

4-1-2- Teneurs en masse

La teneur en masse d'un constituant dans un matériau composite est le rapport entre la masse du constituant et celle du composite mises en jeu.

- **teneur en masse des fibres**

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (4-4)$$

- **teneur en masse de la matrice**

$$M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (4-5)$$

Avec m_f : masse des fibres

m_m : masse de la matrice

m_c : masse du composite

La présence des vides (bulles d'air) dans un composite peut entraîner une diminution significative de ses propriétés de ce matériau.

Si $V_v < 1\%$, le matériau composite est de *qualité*

Un composite est de qualité *médiocre* quand $V_v \geq 5\%$

4-2- MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique est une caractéristique qui représente la quantité de matière (masse) se trouvant dans un espace (une unité de volume). Elle est spécifique à chaque substance et permet de l'identifier.

La masse volumique d'un matériau composite s'obtient, selon la loi des mélanges, par la relation :

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4-6)$$

ρ_f , ρ_m et ρ_c sont respectivement les masses volumiques des fibres, de la matrice et du composite.

Les teneurs en volume interviennent directement dans les relations théoriques décrivant le comportement des matériaux. Par contre, les teneurs en masses ont plus faciles à mesurer lors de l'élaboration ou l'analyse de ces matériaux. Il est donc nécessaire de savoir passer de l'une à l'autre de ces teneurs par les relations

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} \times M_f \quad (4-7)$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} \times M_m \quad (4-8)$$

M_f et M_m sont les teneurs en masse des fibres et de la matrice.

4-3- CONSTANTES ELASTIQUES

Les modules d'élasticité, le module de cisaillement et les coefficients de Poisson sont les principales constantes élastiques d'un matériau.

Ces constantes élastiques dépendent du système d'axes.

Soit un système d'axes rectangulaires (1,2). La direction de l'axe 1 est celle des fibres.

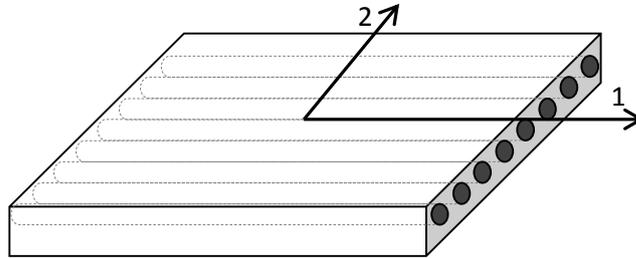


Figure 4-3 : Système d'axes (1,2)

Pour le pli unidirectionnel étudié, selon la loi des mélanges, les modules d'élasticité longitudinale E_1 , transversale E_2 , de cisaillement G_{12} et le coefficient de Poisson ν_{12} ont respectivement les expressions suivantes :

$$E_1 = V_m E_m + V_f E_{f1} \quad (4-9)$$

$$1/E_2 = V_m/E_m + V_f/E_{f2} \quad (4-10)$$

$$1/G_{12} = V_m/G_m + V_f/G_{f12} \quad (4-11)$$

$$\nu_{12} = V_m \nu_m + V_f \nu_{f12} \quad (4-12)$$

Avec

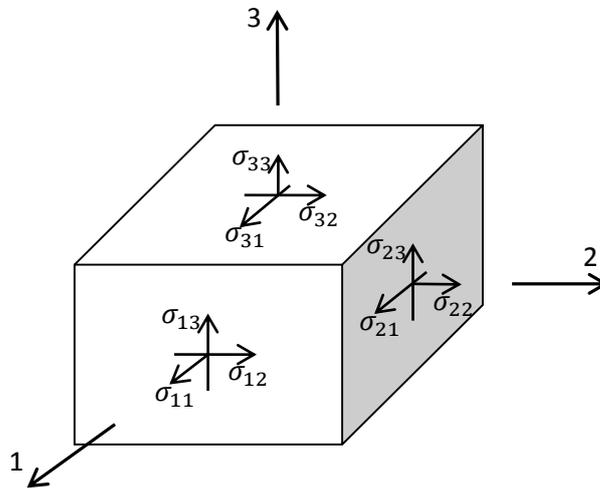
- E_m, G_m, V_m sont respectivement le module d'élasticité, le module de cisaillement et la teneur en volume de la matrice.
- $E_{f1}, E_{f2}, G_{f12}, V_f$ sont le module d'élasticité longitudinale, le module d'élasticité transversale, le module de cisaillement et la teneur en volume des fibres.
- ν_m et ν_{f12} sont les coefficients de Poisson de la matrice et des fibres.

4-4- RAPPELS SUR LA MECANIQUE DES MILIEUX CONTINUS

4-4-1- Tenseur des contraintes

Soit un solide soumis à des forces extérieures, l'état de contrainte en un point de ce solide est défini par la matrice du tenseur des contraintes

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (4-13)$$



σ_{ij} est une contrainte normale si $i = j$

σ_{ij} est une contrainte de cisaillement si i différent de j

4-4-2- Tenseur des déformations

L'état de déformation en un point du matériau est défini par la matrice du tenseur des déformations

$$[\epsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

ε_{ij} est une déformation linéaire si $i = j$

ε_{ij} est une déformation angulaire si i différent de j ($\varepsilon_{ij} = \frac{\gamma_{ij}}{2}$)

Il faut noter que les matrices $[\sigma_{ij}]$ et $[\varepsilon_{ij}]$ sont symétriques.

On pose :

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_2$$

$$\varepsilon_{33} = \varepsilon_3$$

$$2\varepsilon_{23} = 2\varepsilon_{32} = \gamma_{23} = \gamma_{32}$$

$$2\varepsilon_{13} = 2\varepsilon_{31} = \gamma_{13} = \gamma_{31}$$

$$2\varepsilon_{12} = 2\varepsilon_{21} = \gamma_{12} = \gamma_{21}$$

De même

$$\sigma_{11} = \sigma_1$$

$$\sigma_{22} = \sigma_2$$

$$\sigma_{33} = \sigma_3$$

$$\sigma_{23} = \sigma_{32} = \tau_{23} = \tau_{32}$$

$$\sigma_{13} = \sigma_{31} = \tau_{13} = \tau_{31}$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \tau_{12} = \tau_{21}$$

4-4-3- Loi de Hooke généralisée

D'après la loi de Hooke généralisée, la relation entre contraintes et déformations d'un matériau linéaire est donnée par la relation :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4-15)$$

Avec

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{14} & Q_{15} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & Q_{24} & Q_{25} & Q_{26} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & Q_{34} & Q_{35} & Q_{36} \\ Q_{41} & Q_{42} & Q_{43} & Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} \\ Q_{51} & Q_{52} & Q_{53} & Q_{54} & Q_{55} & Q_{56} \\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & Q_{64} & Q_{65} & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

- $[Q]$ est la matrice de rigidité
- σ_i est la contrainte normale appliquée au matériau dans la direction i
- τ_{ij} est la contrainte de cisaillement appliquée au matériau dans la direction j et présente dans le plan ayant pour axe normale i
- ε_i est la déformation relative du matériau dans la direction i
- γ_{ij} est la déformation angulaire subie par le matériau dans le plan ij

Inversement

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (4-17)$$

Avec

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

[S] est appelée matrice de souplesse qui est l'inverse de la matrice de rigidité.

Pour les matériaux orthotropes, la matrice de rigidité devient :

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

4-5- COMPORTEMENT D'UN PLI UNIDIRECTIONNEL

Soient deux systèmes d'axes rectangulaires (1, 2) et (x, y) par rapport auxquels on étudie un pli unidirectionnel.

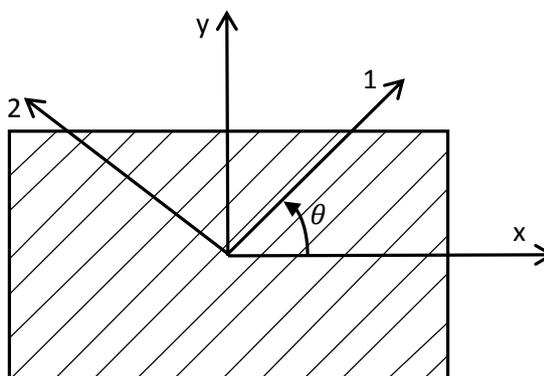


Figure 4-4 : Systèmes d'axes (1,2) et (x, y)

4-5-1-Par rapport au système d'axes (1,2)

Dans le plan formé par les axes 1 et 2, la matrice de rigidité a pour expression :

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

La loi de Hooke pour un pli unidirectionnel permet alors d'écrire :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4-21)$$

Avec
$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \quad (4-22)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \quad (4-23)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \quad (4-24)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (4-25)$$

Avec

- E_1 et E_2 sont respectivement les modules d'élasticité longitudinale et transversale du pli unidirectionnel dans les directions 1 et 2
- G_{12} est le module de cisaillement associé aux directions 1 et 2
- ν_{12} et ν_{21} sont les coefficients de Poisson du matériau relatifs aux directions 1 et 2

✿ Une relation entre contraintes et déformations peut aussi être définie en utilisant la matrice de souplesse.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (4-26)$$

✿ Les deux coefficients de Poisson sont liés par la relation :

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (4-27)$$

4-5-2- Par rapport à un système d'axes (x, y)

On considère un système de coordonnées (x, y) dont l'axe x fait un angle θ avec l'axe 1 du repère rectangulaire (1,2).

Soient $[\bar{Q}]$ la nouvelle matrice de rigidité dans le système d'axes (x, y) et \bar{Q}_{ij} ses composantes.

La loi de Hooke s'exprime alors par la relation

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4-28)$$

Avec σ_x , σ_y et τ_{xy} sont respectivement la contrainte normale suivant x, la contrainte normale suivant y et la contrainte de cisaillement dans le plan xy.

ε_x , ε_y et γ_{xy} sont les déformations relatives suivant la direction x, la direction y et la déformation angulaire subie dans le plan xy.

En posant $c = \cos \theta$ et $s = \sin \theta$, on peut montrer que les expressions des composantes de la matrice de rigidité sont données par les relations suivantes :

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (4-29)$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \quad (4-30)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (4-31)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \quad (4-32)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s \quad (4-33)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4) \quad (4-34)$$

Les expressions des constantes élastiques sont fonction des composantes de la matrice de souplesse $[\bar{S}]$ dans le système de coordonnées (x,y) .

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \quad (4-35)$$

Les modules d'élasticité dans les directions des axes x et y d'un pli unidirectionnel sont déterminés par les relations:

$$E_x = \frac{1}{\bar{S}_{11}} \quad (4-36)$$

$$E_y = \frac{1}{\bar{S}_{22}} \quad (4-37)$$

Le coefficient de Poisson ν_{xy} est défini par :

$$\nu_{xy} = -\frac{\bar{S}_{12}}{\bar{S}_{11}} \quad (4-38)$$

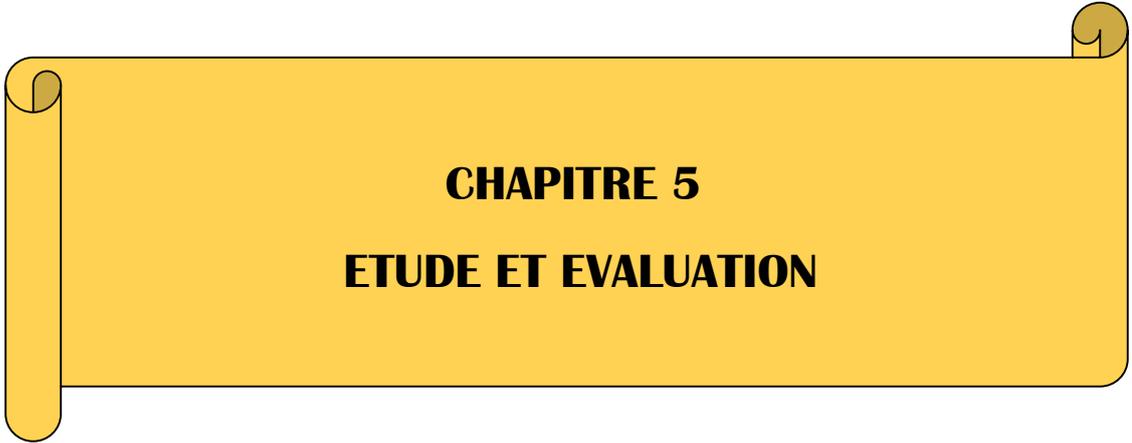
Le module de cisaillement a pour expression :

$$G_{xy} = \frac{1}{\bar{S}_{66}} \quad (4-39)$$

➤ Ce chapitre a été consacré à la détermination des caractéristiques d'un pli de composite unidirectionnel qui joue un rôle important dans une structure composite.

Il a été montré que les constantes élastiques du pli dépendent de celles des fibres et de la matrice. Elles sont également fonction de la quantité de chaque élément constitutif du matériau.

La masse volumique qui est une propriété physique d'un composite varie aussi avec les masses volumiques et les volumes des constituants utilisés.

A yellow scroll graphic with a black outline and a drop shadow. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the unrolled portion.

CHAPITRE 5
ETUDE ET EVALUATION



Le pli est l'élément de base d'une structure composite.

Le but de ce travail est d'étudier et évaluer les caractéristiques élastiques des plis de composite unidirectionnel à fibres végétales.

L'étude a été effectuée sur les plis unidirectionnels à fibres longues de Sisal/Polyester et de Bambou/Polyester.

En effet, les matériaux composites étudiés ont pour renforts les fibres de sisal et de bambou et pour matrice le polyester. Les propriétés d'un composite dépendent des caractéristiques et des quantités de fibres et de matrice constituant le matériau.

5-1- HYPOTHESES

Pour notre étude, les hypothèses suivantes seront adoptées :

- Les fibres (renforts) sont réparties uniformément au sein de la structure.
- Il n'y a pas de présence de vides dans le composite.
- Il y a une parfaite adhérence entre les renforts et la matrice (absence de glissement entre ces derniers).

5-2- PRESENTATION DU LOGICIEL

Pour réaliser cette étude, un logiciel, écrit en langage MATLAB, a été conçu.

Le logiciel créé a pour fonction d'étudier le comportement élastique d'un pli de composite à fibres unidirectionnelles en estimant les valeurs de ses constantes élastiques et déterminant les matrices de rigidité et de souplesse. Il permet également d'obtenir la variation de ces constantes en fonction de la teneur en masse des fibres et de la direction de ces dernières.

Ce logiciel comporte six interfaces.

➤ L'interface de démarrage

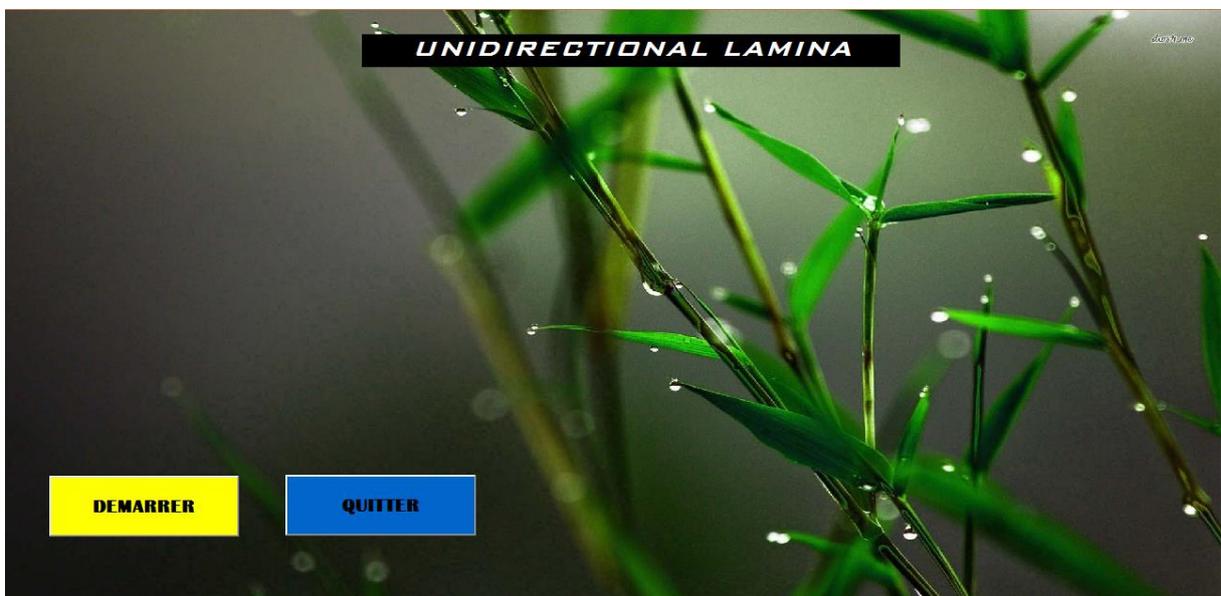


Figure 5-1 : Interface de démarrage

➤ La première fenêtre du logiciel

Elle reçoit les caractéristiques des fibres et de la matrice ainsi que les teneurs en masse respectives.

The screenshot shows a software interface for material property input. It features several yellow input boxes for numerical values and blue buttons for material selection and calculation. The background is a green bamboo forest.

- Inputs:**
 - Teneur en masse des fibres: 0.7
 - Teneur en masse de la matrice: 0.3
 - Masse volumique des fibres (kg/dm³): []
 - Masse volumique de la matrice (kg/dm³): []
 - Module d'élasticité longitudinale des fibres E_{f1} (GPa): []
 - Module d'élasticité transversale des fibres E_{f2} (GPa): []
 - Module de cisaillement des fibres G_{f12} (GPa): []
 - Coefficient de Poisson des fibres ν_{f12}: []
 - Module d'élasticité de la matrice E_m (GPa): []
 - Module de cisaillement de la matrice G_m (GPa): []
 - Coefficient de Poisson de la matrice ν_{m12}: []
- Buttons:**
 - SISAL
 - BAMBOU
 - POLYESTER
 - RETOUR
 - COURBE DE VARIATION f(mf)
 - CALCULER

Figure 5-2 : Première fenêtre du logiciel

➤ La deuxième fenêtre

Elle affiche les courbes représentatives des constantes élastiques en fonction de la teneur en masse M_f.

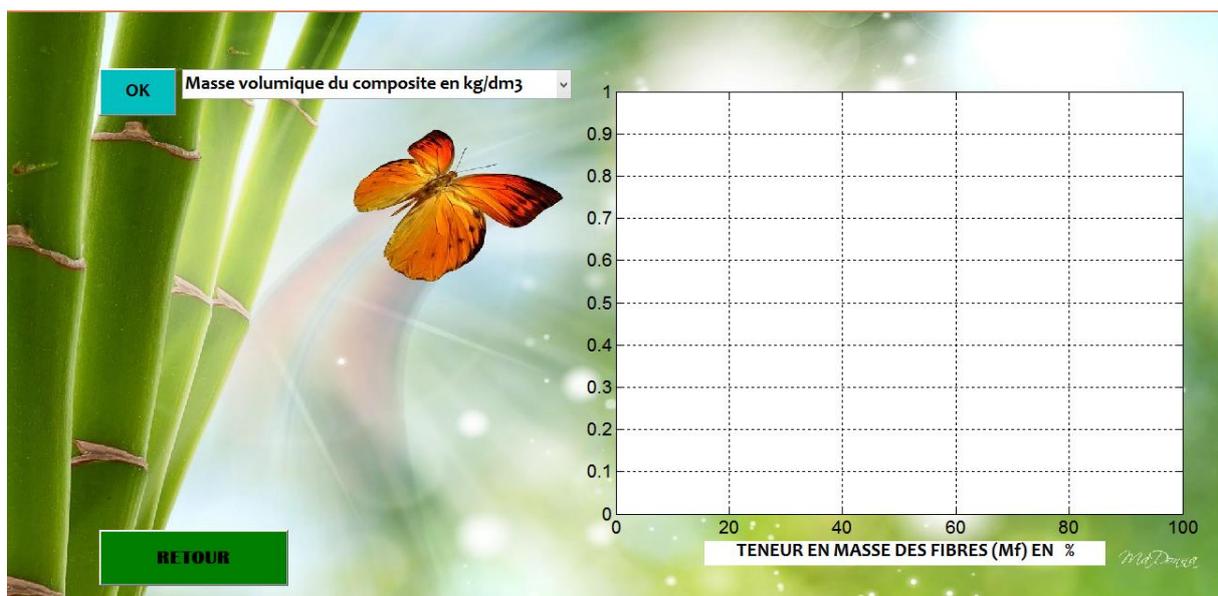


Figure 5-3 : Deuxième fenêtre du logiciel

➤ La troisième fenêtre

Elle montre les valeurs des constantes élastiques ainsi que les matrices de rigidité et de souplesse du pli étudié dans le repère (1,2) pour une teneur en masse des fibres donnée.



Figure 5-4 : Troisième fenêtre du logiciel

➤ La quatrième fenêtre

Elle donne les courbes représentatives des constantes élastiques en fonction de l'angle d'inclinaison θ des fibres.

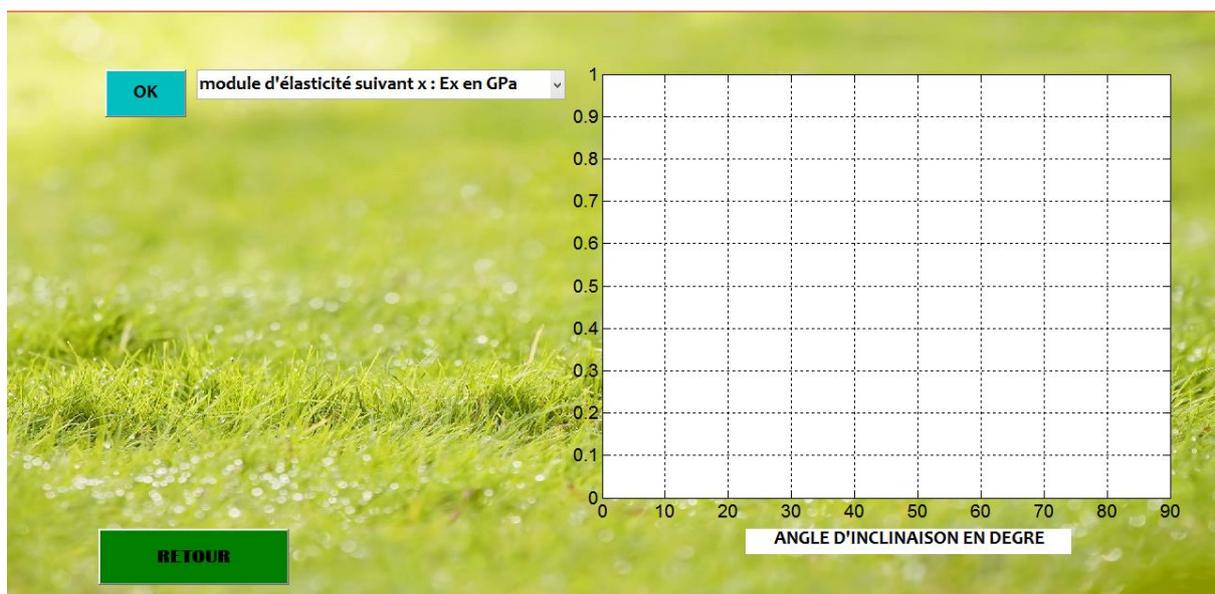


Figure 5-5 : Quatrième fenêtre du logiciel

➤ La cinquième fenêtre

Cette fenêtre affiche les valeurs des constantes élastiques ainsi que les matrices de rigidité et de souplesse du pli étudié dans le repère (x, y).

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- Angle d'orientation (°)**: Input field with an **OK** button.
- Module d'élasticité du composite suivant x (GPa)**: Input field.
- Coefficient de Poisson xy du composite**: Input field.
- Module de cisaillement du composite (GPa)**: Input field.
- Module d'élasticité du composite suivant y (GPa)**: Input field.
- Coefficient de Poisson yx du composite**: Input field.
- MATRICE DE RIGIDITE (GPa)**: Output matrix **Q =** with a 3x3 grid of input fields.
- MATRICE DE TRANSFORMATION**: Output matrix **T =** with a 3x3 grid of input fields.
- MATRICE DE SOUPLESSE (GPa⁻¹)**: Output matrix **S =** with a 3x3 grid of input fields.
- RETOUR**: A green button at the bottom left.

Figure 5-6 : Cinquième fenêtre du logiciel

5-3- PRESENTATION DES RESULTATS

5-3-1- PLI SISAL/POLYESTER

5-3-1-1- Constantes élastiques dans le repère (1, 2)

Les constantes élastiques dépendent des quantités des constituants du matériau composite. Les figures suivantes montrent les variations de ces constantes avec les teneurs en masse des fibres de sisal et du polyester.

Pratiquement, la teneur en volume des fibres doit être comprise entre 25 et 75%.

Ce qui correspond, pour le pli de composite unidirectionnel Sisal/Polyester, à une teneur en masse des fibres de sisal comprise entre 30 et 78%.

Les résultats suivants sont obtenus pour $E_{f1} = 25$ GPa, $E_{f2} = 3,85$ GPa et $G_{12} = 1,1$ GPa selon le tableau 3-2.

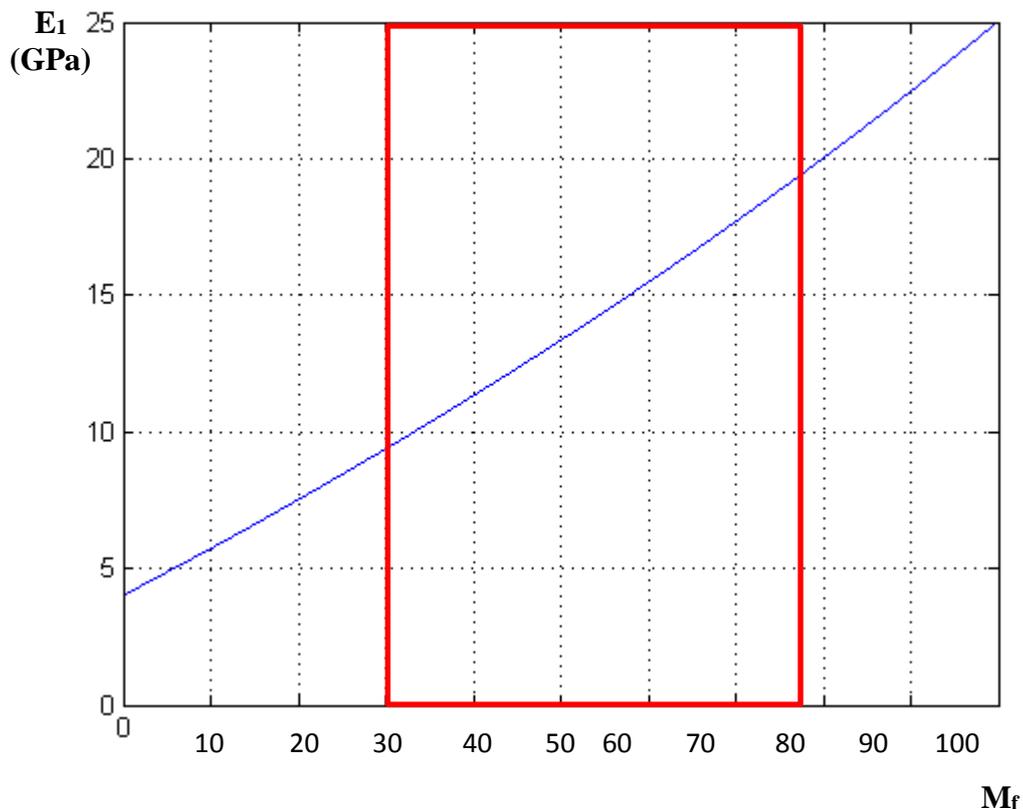
a) Modules d'élasticité

Figure 5-7 : Variation de E_1 du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f

La figure montre que le module d'élasticité longitudinale du pli de composite unidirectionnel Sisal/Polyester varie presque linéairement avec la teneur en masse des fibres de sisal. En effet, sa valeur augmente avec la quantité des fibres utilisées.

Par conséquent, si le pli Sisal/Polyester est soumis à une force de traction dans la direction longitudinale des fibres, il subira moins de déformation dans cette direction si la teneur en masse des fibres est élevée.

Par ailleurs, au fur et à mesure que M_f augmente, la valeur de E_1 tend vers celle du module d'élasticité longitudinale des fibres (25 GPa). Par contre, lorsque M_f diminue, la valeur du module d'élasticité longitudinale du pli se rapproche de celle de la résine polyester (4 GPa).

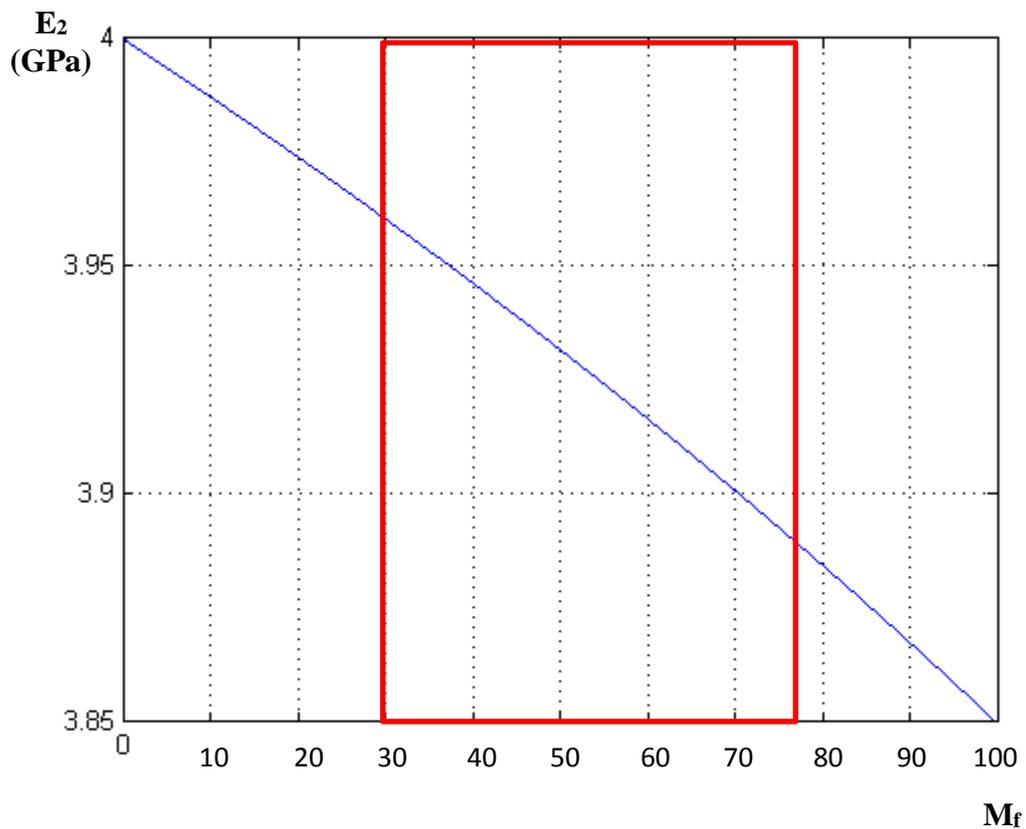


Figure 5-8 : Variation de E_2 du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f

Selon cette figure, quel que soit la valeur de M_f , celle du module d'élasticité transversale du pli est comprise entre 3.85 et 4 GPa, Donc, les valeurs du module d'élasticité transversale de la matrice et de celui du renfort sont pratiquement égales.

Néanmoins, la valeur du module d'élasticité transversale du pli unidirectionnel Sisal/Polyester diminue lorsque la teneur en masse des fibres de sisal augmente.

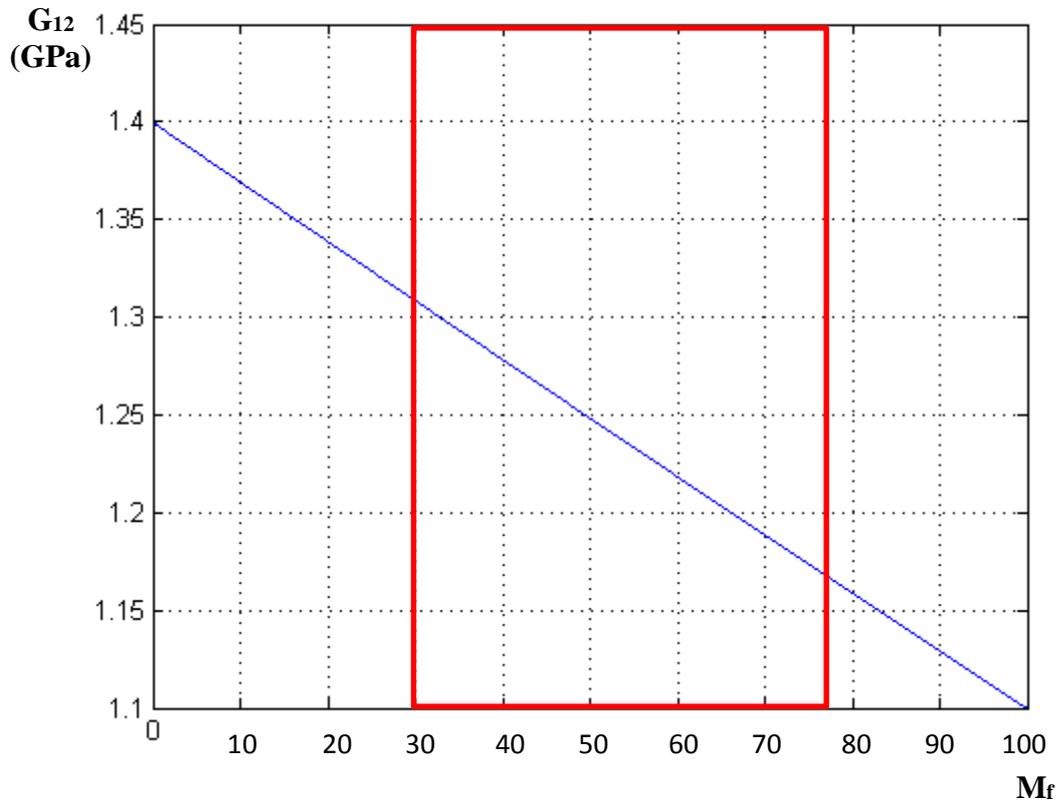
a) Module de cisaillement

Figure 5-9 :Variation de G_{12} du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f

D'après cette figure, la valeur du module de cisaillement G_{12} du pli unidirectionnel Sisal/Polyester ne varie pas trop puisqu'elle reste entre 1.1 et 1.4 GPa quel que soit la teneur en masse des fibres de sisal.

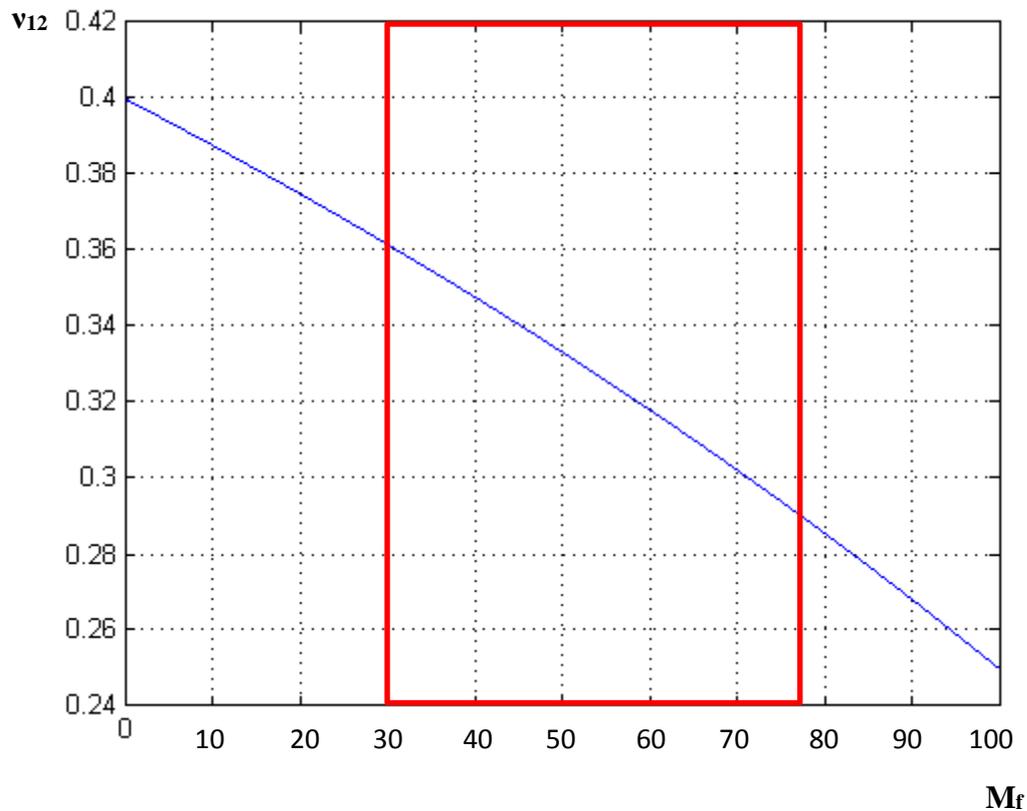
b) Coefficients de Poisson

Figure 5-10 :Variation de ν_{12} du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f

La valeur du coefficient de Poisson ν_{12} du pli Sisal/Polyester varie également avec la quantité de fibres dans le composite. En effet, lorsque M_f augmente, le coefficient de Poisson ν_{12} diminue.

Par conséquent, plus la teneur en masse des fibres est élevée, moins le pli se déforme transversalement s'il est soumis à une charge longitudinale

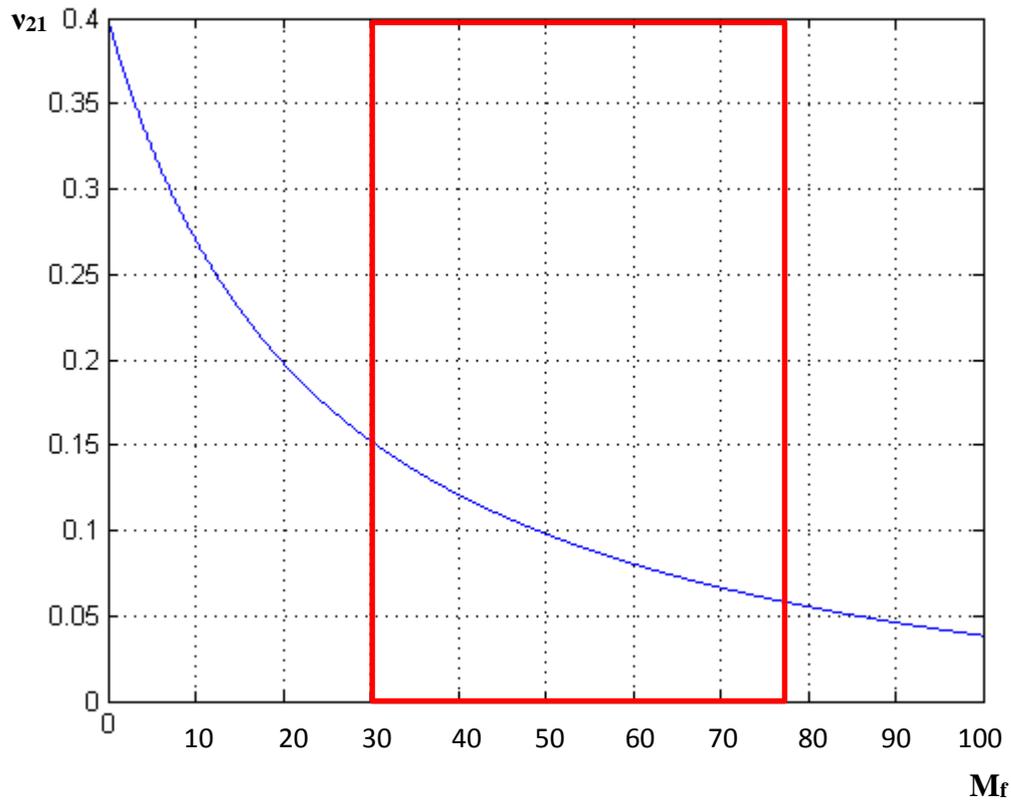


Figure 5-11 : Variation de v_{21} du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f

Tout comme le coefficient v_{12} , le coefficient de Poisson v_{21} du pli Sisal/Polyester diminue lorsqu'on augmente la teneur en masse des fibres. Mais il est à noter que les courbes représentatives de ces deux coefficients de Poisson n'ont pas la même allure. Par ailleurs, la diminution de v_{21} est plus marquée que celle de v_{12} pour les valeurs de M_f inférieures à 40%.

⇒ La légèreté est l'une des principales propriétés recherchées pour les matériaux composites. C'est la raison pour laquelle nous avons également construit la courbe représentative de la masse volumique du pli unidirectionnel Sisal/Polyester en fonction de la teneur en masse des fibres de sisal.

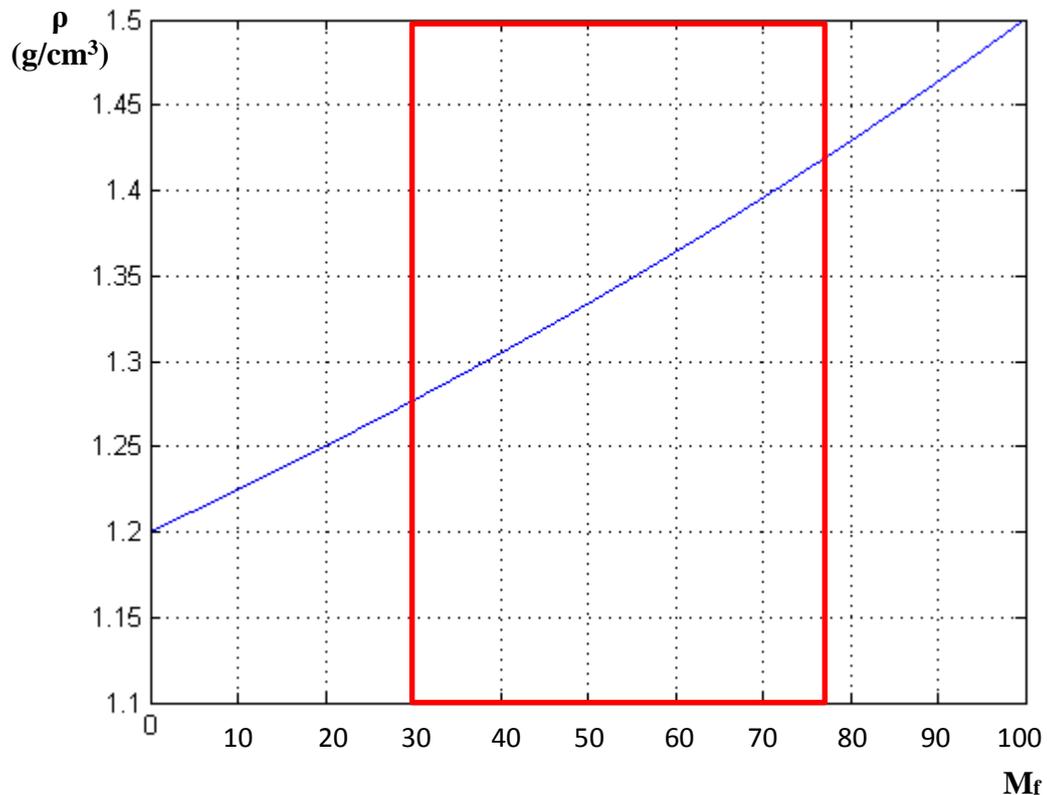


Figure 5-12 : Variation de ρ du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f

D'après cette courbe, la masse volumique du pli unidirectionnel Sisal/Polyester augmente avec la teneur en masse des fibres de sisal. Elle est comprise entre 1.2 et 1.5 g/cm³.

➤ Si la teneur en volume des fibres dans un pli est trop élevée, la matrice pourrait ne pas pouvoir contenir toutes les fibres ou bien transmettre les efforts à ces dernières. Dans le cas contraire, si cette teneur est trop faible, les caractéristiques du composite obtenu reviendraient à celles de la matrice. Donc, c'est à l'ingénieur de conception de choisir la quantité de fibres nécessaires.

Tableau 5-1 : Constantes élastiques du pli Sisal/Polyester pour M_f égale à 30 et 78%

<i>Teneur en masse des fibres de sisal</i>	30 %	78 %
E_1 (GPa)	9.361	19.526
E_2 (GPa)	3.960	3.888
G_{12} (GPa)	1.308	1.165
ν_{12}	0.361	0.289
ν_{21}	0.153	0.057

Dans tout ce qui suit, pour avoir un aperçu du comportement élastique d'un pli unidirectionnel Sisal/Polyester, un pli dont la teneur en masse des fibres est égale à 70% sera considéré.

Voici les résultats obtenus.

- Constantes élastiques

$$E_1 = 17.674 \text{ GPa}$$

$$E_2 = 3.901 \text{ GPa}$$

$$G_{12} = 1.188 \text{ GPa}$$

$$\nu_{12} = 0.302$$

$$\nu_{21} = 0.066$$

- Matrices de rigidité et de souplesse

$$Q = \begin{bmatrix} 18.038 & 1.203 & 0 \\ 1.203 & 3.981 & 0 \\ 0 & 0 & 1.188 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.056 & -0.017 & 0 \\ -0.017 & 0.256 & 0 \\ 0 & 0 & 0.841 \end{bmatrix}$$

5-3-1-2- Constantes élastiques dans le repère (x, y)

L'orientation du repère lié au composite fait varier les constantes élastiques. En effet, on a considéré un repère rectangulaire quelconque d'axes x et y faisant un angle θ par rapport au système d'axes naturels du pli unidirectionnel. Les résultats obtenus montrent bien cette variation.

a) Modules d'élasticité

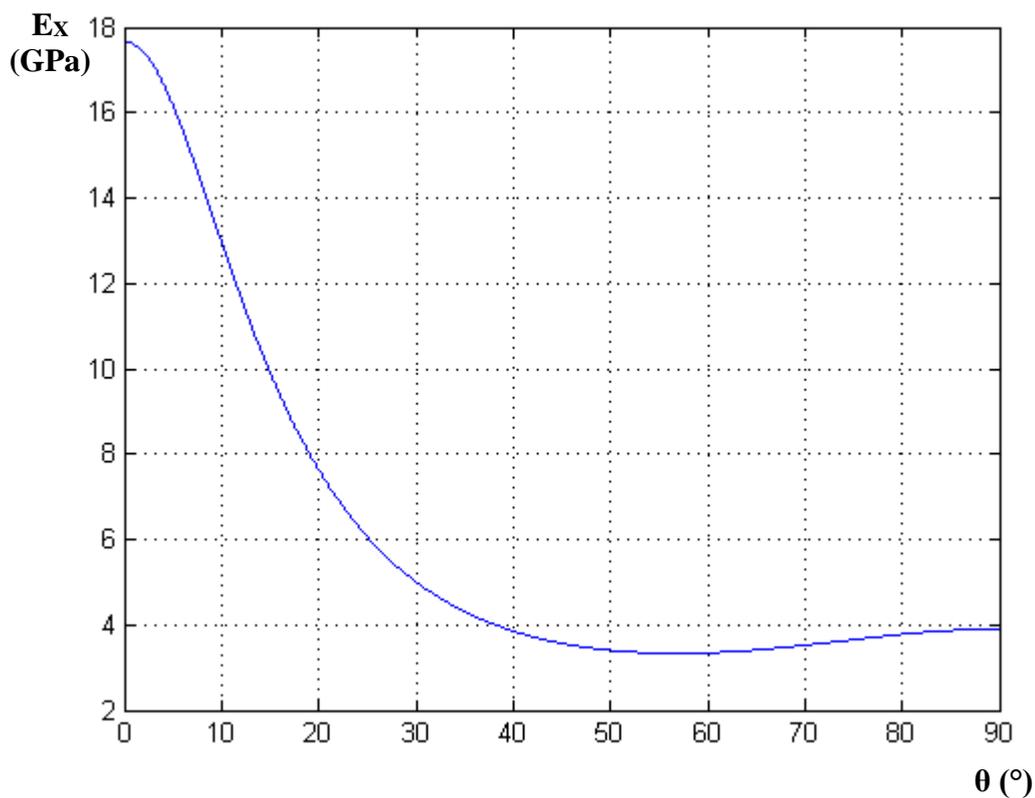


Figure 5-13 : Variation de E_x du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

Selon cette courbe :

- ⇒ la valeur du module d'élasticité E_x du pli suivant x chute rapidement de 18 à 5GPa quand l'angle θ varie de 0 à 30°.Ce qui montre bien que E_x est très sensible pour des valeurs de θ comprises entre 0 et 30°.
- ⇒ E_x est maximale dans la direction longitudinale des fibres (à 0°) et minimale à $\theta \approx 55^\circ$.

Par conséquent, lors de l'élaboration d'un stratifié par exemple, des fibres des plis unidirectionnels devraient être orientés dans la direction des contraintes à appliquer au matériau.

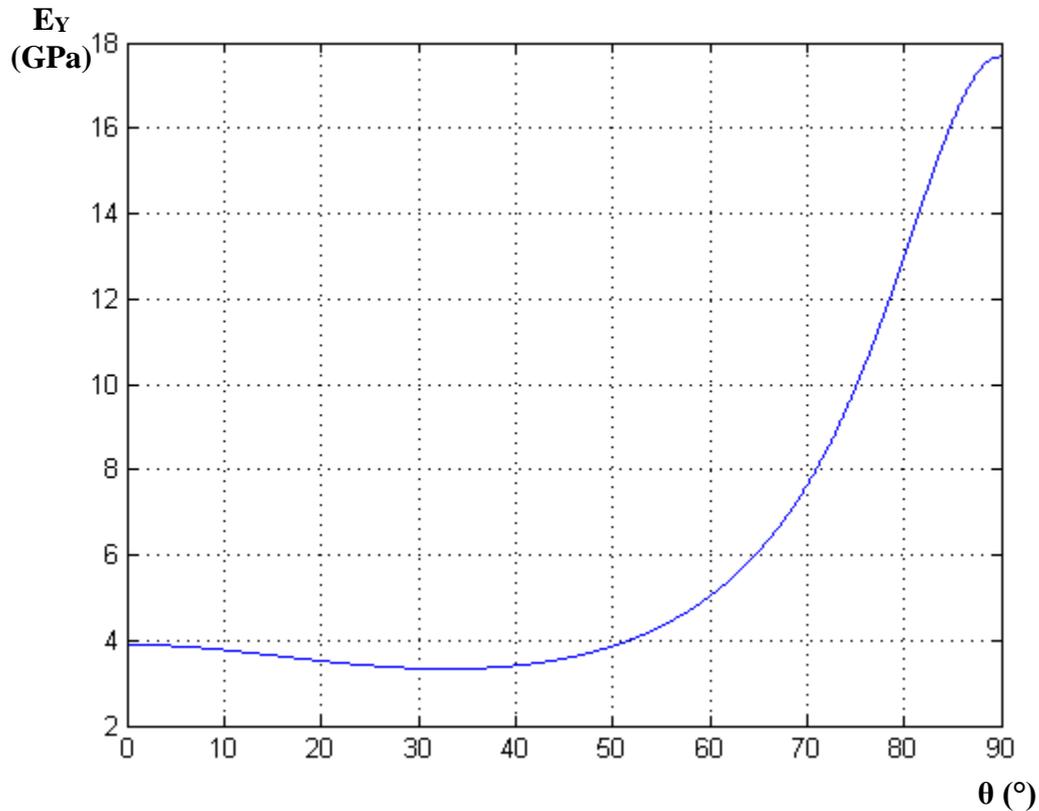


Figure 5-14 : Variation de E_Y du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

La courbe montre que, contrairement à E_X , les valeurs maximale et minimale du module d'élasticité E_Y correspondent respectivement à $\theta = 90^\circ$ et $\theta \approx 35^\circ$.

Il a également été remarqué qu'à partir de $\theta = 50^\circ$, la valeur de E_Y augmente rapidement avec θ .

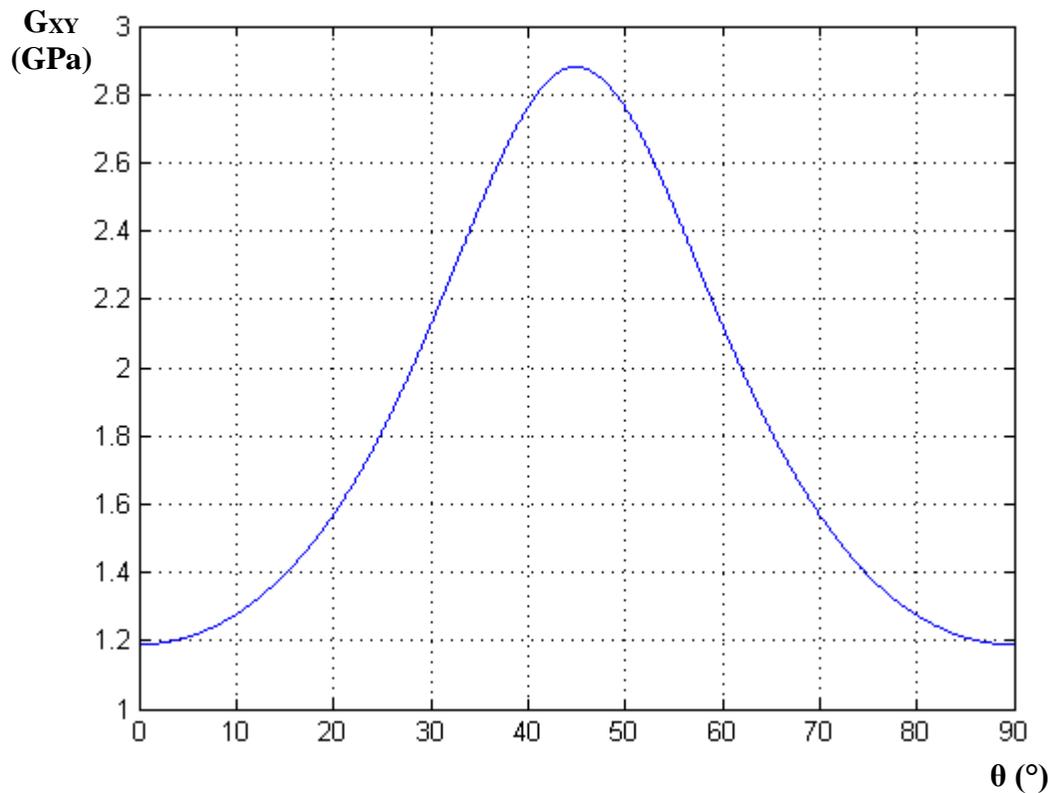
b) Module de cisaillement

Figure 5-15 :Variation de G_{XY} du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

La figure montre bien que la valeur du module de cisaillement G_{XY} du pli est maximale (2.85 GPa) pour un angle d'inclinaison des fibres de 45° et minimale (1.2 GPa) pour les angles de 0° et de 90° .

Donc, pour réduire la déformation angulaire du pli causée par une contrainte de cisaillement, il faut incliner les fibres d'un angle de 45° .

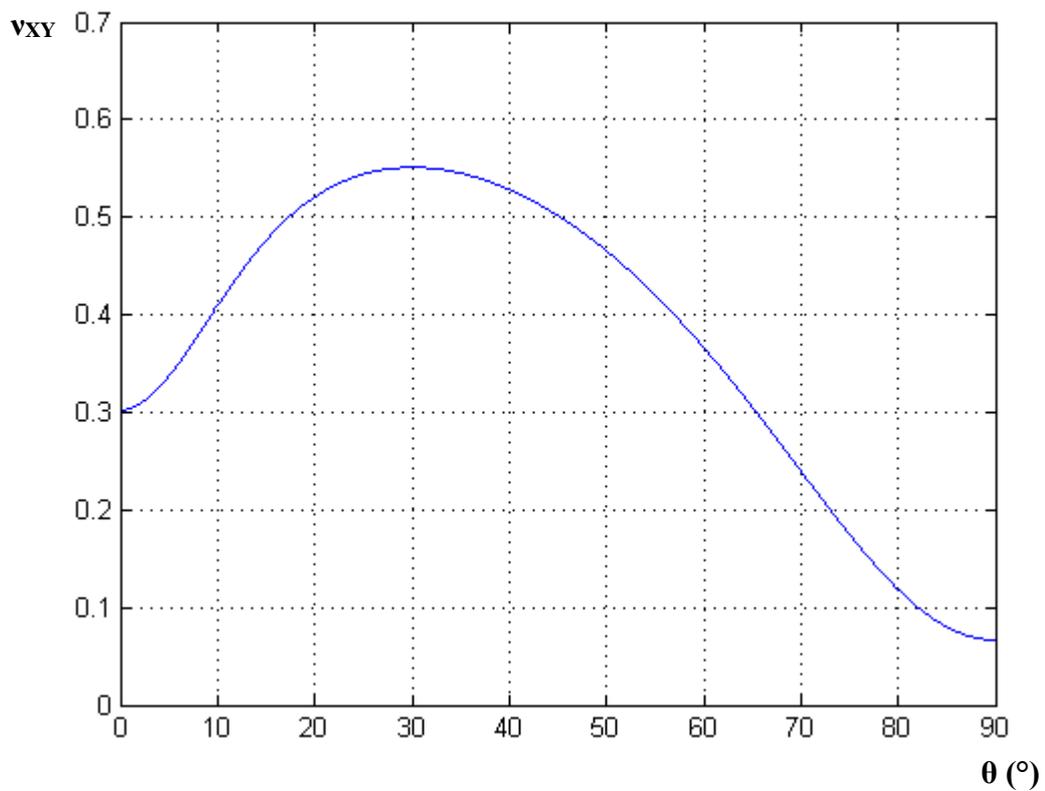
c) Coefficient de Poisson

Figure 5-16 : Variation de v_{XY} du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

La courbe permet de constater que le coefficient de Poisson v_{XY} du pli croît avec l'angle θ jusqu'à ce que ce dernier atteigne 30° , valeur à laquelle correspond la valeur maximale de v_{XY} (0.55). Puis cette valeur décroît au fur et à mesure que l'angle d'inclinaison des fibres augmente. Et à 90° , v_{XY} atteint sa valeur minimale de (0.08).

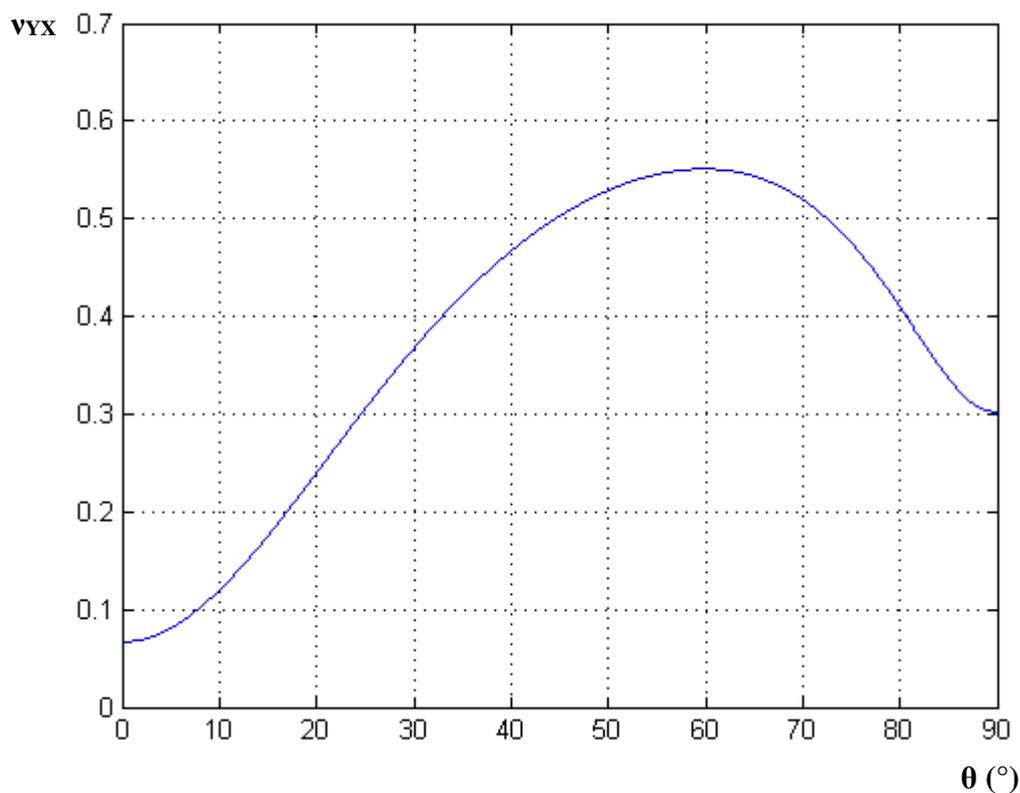


Figure 5-17 : Variation de ν_{YX} du pli Sisal/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

Inversement au comportement de ν_{XY} , le coefficient de Poisson ν_{YX} augmente avec θ jusqu'à ce que celui-ci soit égal à 60° et après il diminue.

A titre d'application, un pli unidirectionnel Sisal/Polyester dont $M_f = 70\%$ et $\theta = 45^\circ$ sera considéré. Et c'est à l'aide du logiciel que les constantes élastiques et les matrices de rigidité et de souplesse ont été déterminées.

- Constantes élastiques

$$E_X = 3.572 \text{ GPa}$$

$$E_Y = 3.572 \text{ GPa}$$

$$G_{XY} = 2.880 \text{ GPa}$$

$$\nu_{XY} = 0.502$$

$$\nu_{YX} = 0.502$$

- Matrices de rigidité et de souplesse

$$Q = \begin{bmatrix} 7.295 & 4.918 & 3.514 \\ 4.918 & 7.295 & 3.514 \\ 3.514 & 3.514 & 4.903 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.280 & -0.140 & -0.099 \\ -0.140 & 0.280 & -0.099 \\ -0.099 & -0.099 & 0.347 \end{bmatrix}$$

5-3-2- PLI BAMBOU/POLYESTER

L'étude a été exactement menée de la même façon que celle faite pour le cas du Sisal/Polyester.

La recherche bibliographique que nous avons effectuée sur les fibres de bambou ne nous a pas permis de connaître toutes leurs caractéristiques élastiques.

D'après cette recherche, les modules d'élasticité longitudinale et transversale des fibres de bambou sont respectivement $E_{f1} = 39.2$ GPa et $E_{f2} = 5.9$ GPa.

Quant aux valeurs de G_{f12} et de ν_{f12} , elles sont estimées à 1 GPa et 0.2.

Comme pour le cas du pli Sisal/Polyester, il est préférable que la teneur en volume des fibres dans le pli unidirectionnel Bambou/Polyester soit comprise entre 25 et 75%.

Ce qui équivaut à une teneur en masse des fibres de bambou comprise entre 28 et 77%.

Les résultats obtenus sont les suivants.

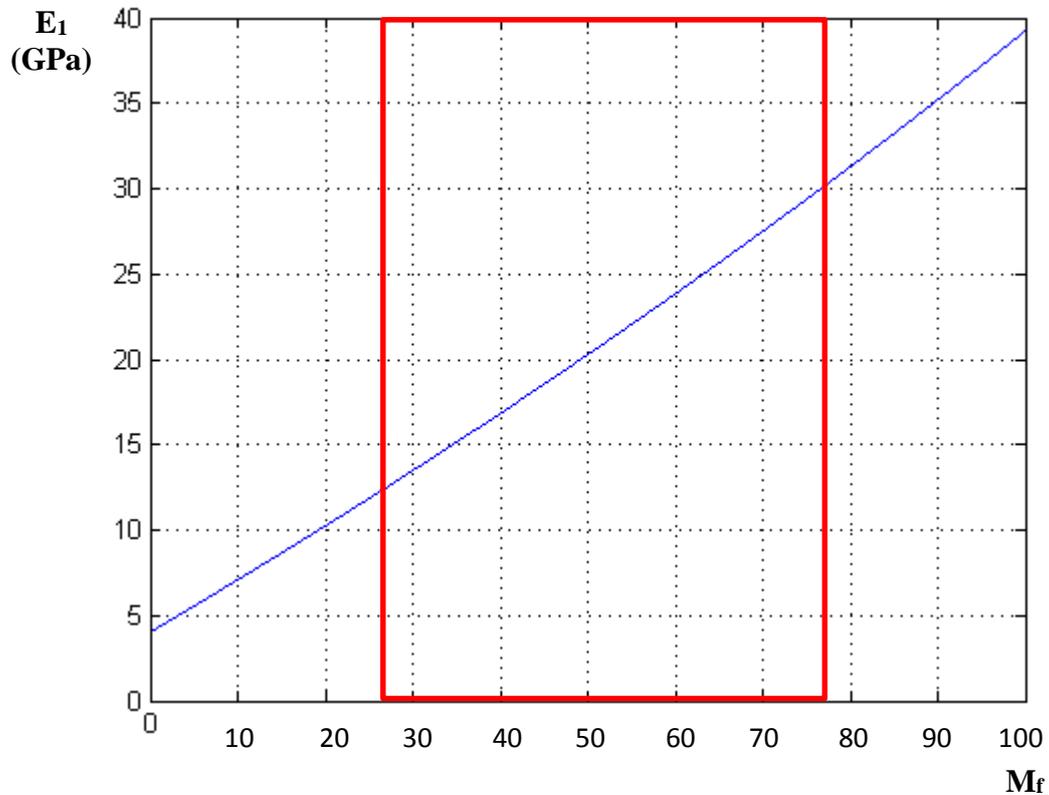
5-3-2-1- Constantes élastiques dans le repère (1, 2)*a) Modules d'élasticité*

Figure 5-18 : Variation de E_1 du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f

D'après cette figure, la valeur du module d'élasticité longitudinale du pli unidirectionnel Bambou/Polyester augmente linéairement avec la teneur en masse des fibres de bambou.

Elle varie de 4 à 39 GPa, valeurs correspondant respectivement à $M_f = 0$ et $M_f = 100\%$.

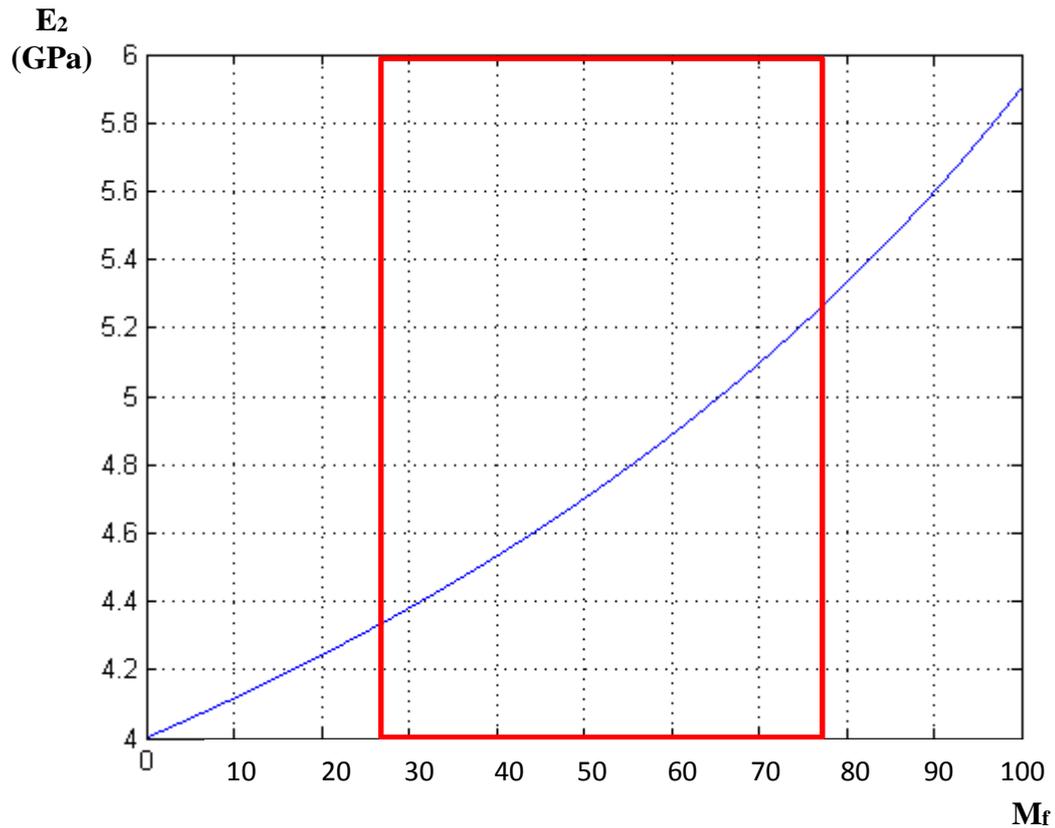


Figure 5-19 : Variation de E_2 du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f

La valeur du module d'élasticité transversale du pli Bambou/Polyester augmente également avec la teneur en masse des fibres de bambou.

Donc, pour réduire la déformation transversale du pli causée par une contrainte de traction transversale, il faut aussi augmenter la teneur en masse des fibres dans ce pli.

Selon cette figure, pour le pli unidirectionnel Bambou/Polyester, E_2 varie de 4 à 5.9 GPa.

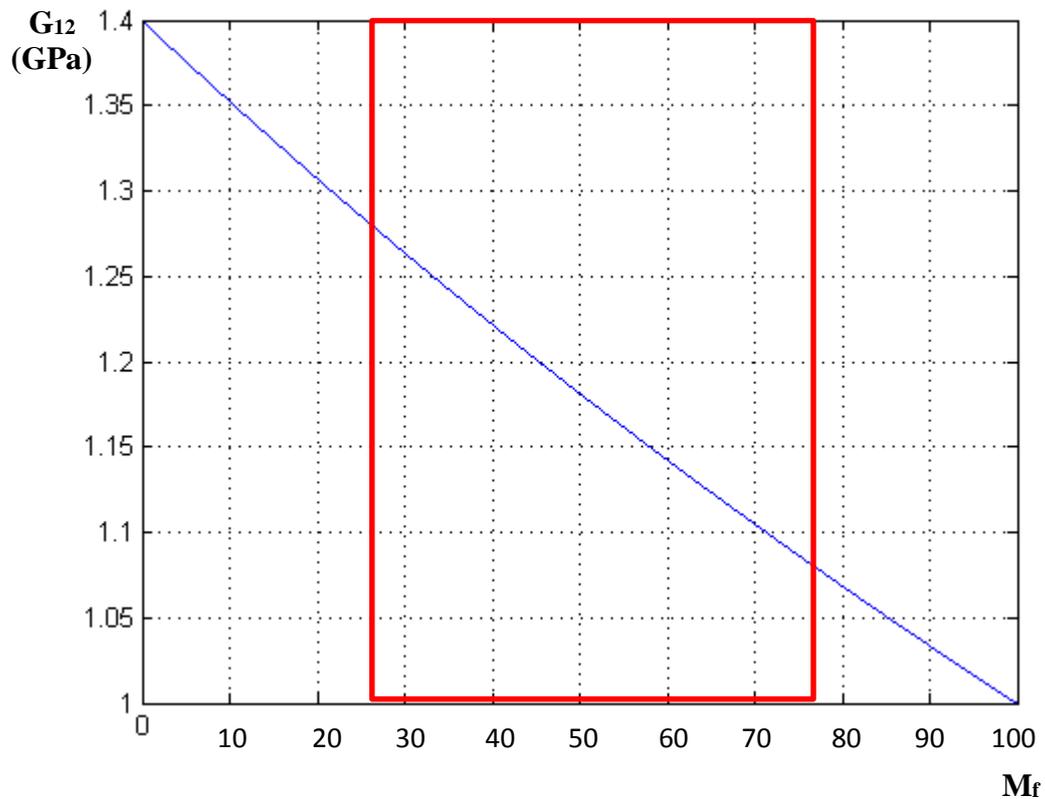
b) Module de cisaillement

Figure 5-20 : Variation de G_{12} du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f

La courbe représentative du module de cisaillement du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f montre que G_{12} diminue quand M_f augmente. Ce module de cisaillement varie de 1.4 à 1 GPa.

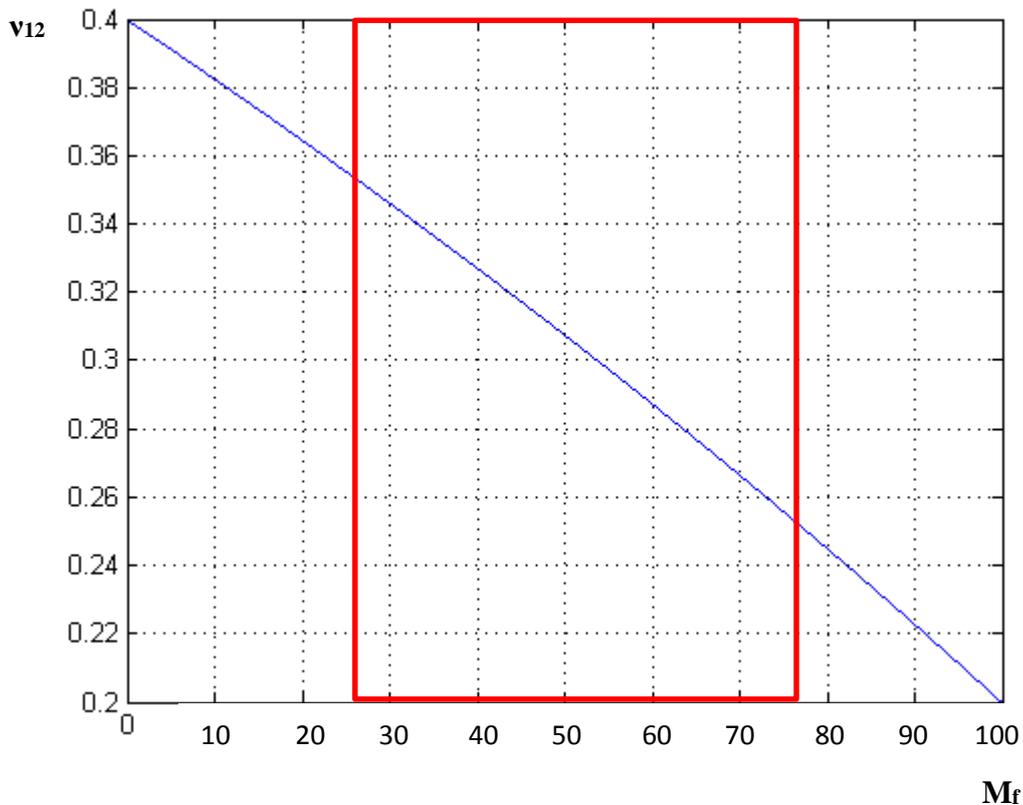
c) Coefficients de Poisson

Figure 5-21 : Variation de v_{12} du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f

La valeur du coefficient de Poisson v_{12} du pli unidirectionnel Bambou/Polyester diminue lorsque la teneur en masse de ses fibres augmente. Cette valeur est comprise entre 0.2 et 0.4 selon la teneur en masse des fibres de bambou.

Ce qui signifie que pour un pli contenant moins de fibres, la déformation transversale qui en résulte est plus grande que celle d'un pli dont M_f est élevée lorsque ces plis sont soumis à une même valeur de l'intensité d'une force orientée dans la direction longitudinale des fibres.

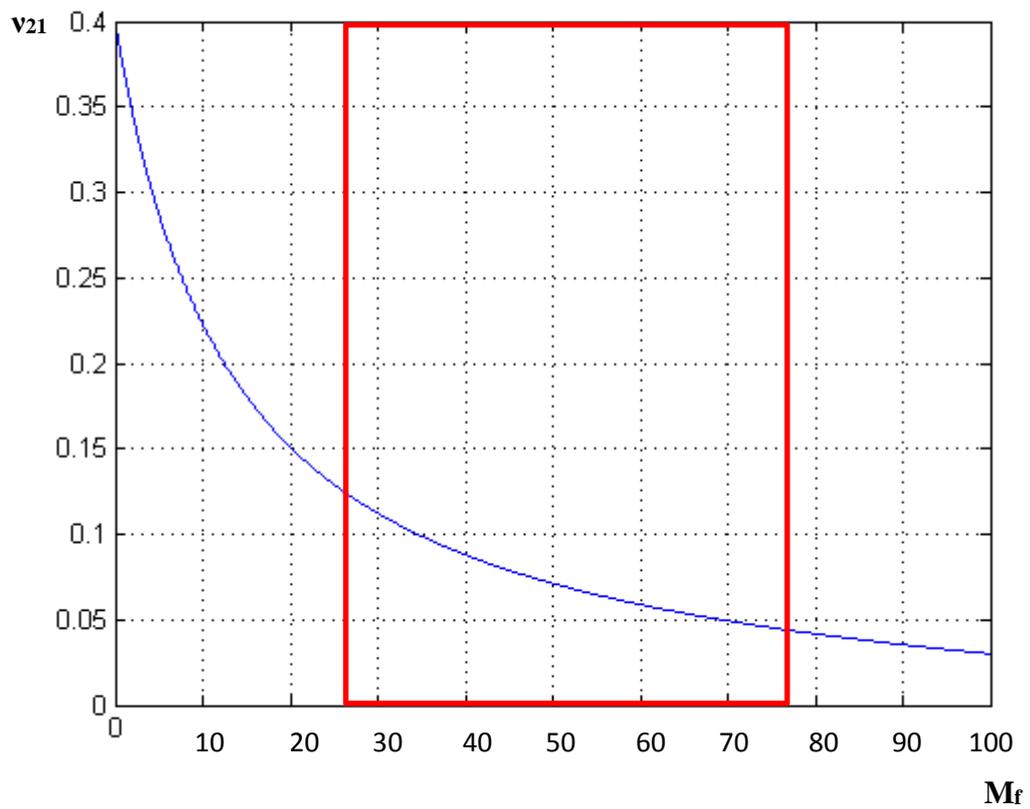


Figure 5-22 : Variation de v_{21} du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f

Cette figure qui montre la variation du coefficient de Poisson v_{21} du pli Bambou/Polyester en fonction de la teneur en masse des fibres de bambou indique que la courbe représentative de ce coefficient peut se diviser en deux parties :

- la partie où v_{21} diminue très rapidement de 0.4 à 0.1 pour M_f inférieure à 30%.
- la partie où v_{21} décroît lentement de 0.1 à 0.03 pour M_f supérieure à 30%.

⇒ Pour la même raison que pour celle du pli Sisal/Polyester, la courbe représentative de la masse volumique du pli unidirectionnel Bambou/Polyester en fonction de la teneur en masse des fibres de bambou a également été tracée.

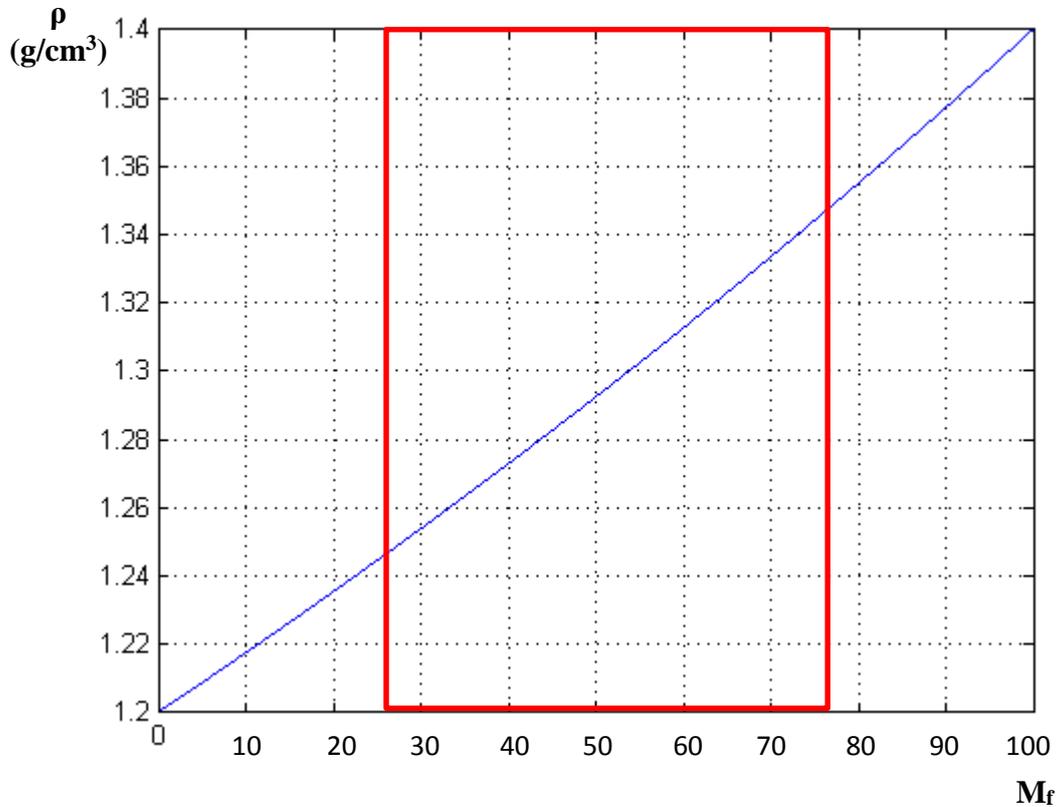


Figure 5-23 : Variation de ρ du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f

Selon cette courbe, la masse volumique du pli unidirectionnel Bambou/Polyester augmente aussi avec la teneur en masse de ses fibres. Elle est comprise entre 1.2 et 1.4 g/cm³.

Tableau 5-2 : Constantes élastiques du pli Bambou/Polyester pour M_f égale à 28 et 77%

<i>Teneur en masse des fibres de bambou</i>	28 %	77 %
E_1 (GPa)	12.8	30.103
E_2 (GPa)	4.350	5.255
G_{12} (GPa)	1.272	1.079
ν_{12}	0.35	0.251
ν_{21}	0.119	0.044

En considérant un pli unidirectionnel Bambou/Polyester dont la teneur en masse des fibres est de 70%, on obtient les résultats ci-après.

- Constantes élastiques

$$E_1 = 27.466 \text{ GPa}$$

$$E_2 = 5.093 \text{ GPa}$$

$$G_{12} = 1.105 \text{ GPa}$$

$$\nu_{12} = 0.266$$

$$\nu_{21} = 0.049$$

- Matrices de rigidité et de souplesse

$$Q = \begin{bmatrix} 27.833 & 1.376 & 0 \\ 1.376 & 5.161 & 0 \\ 0 & 0 & 1.105 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.036 & -0.009 & 0 \\ -0.009 & 0.196 & 0 \\ 0 & 0 & 0.904 \end{bmatrix}$$

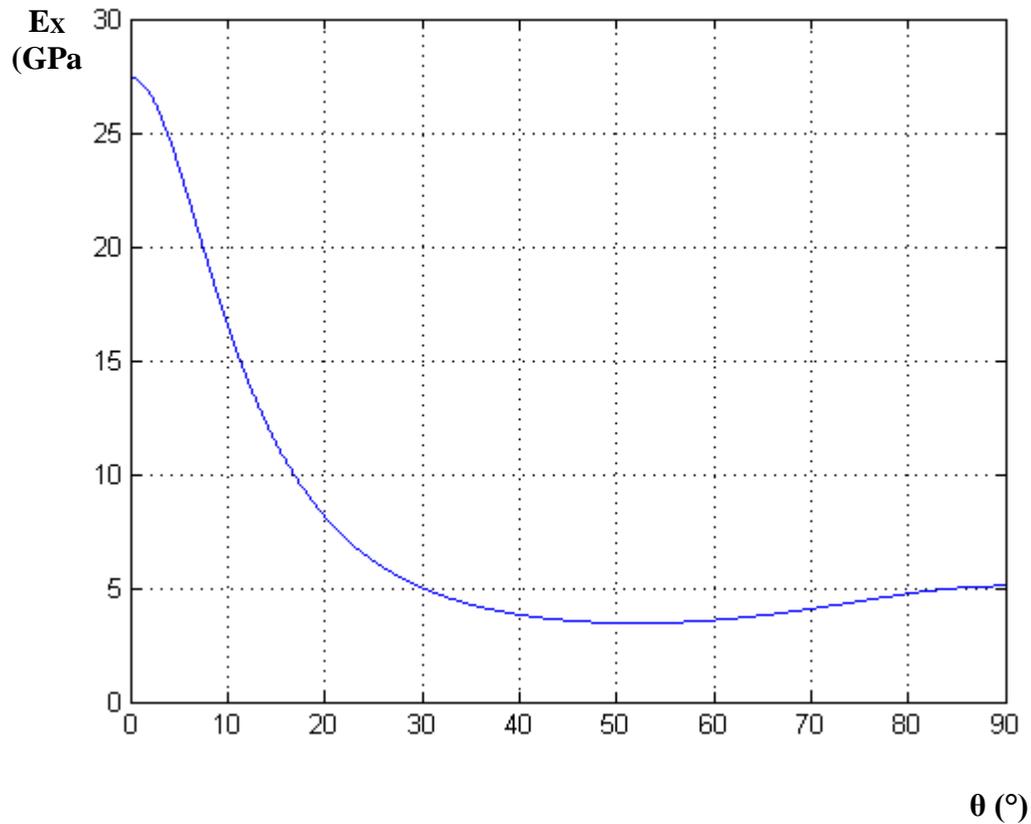
5-3-2-2- Constantes élastiques dans le repère (x, y)*a) Modules d'élasticité*

Figure 5-24 : Variation de E_x du pli Bambou/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

La courbe du module d'élasticité E_x du pli Bambou/Polyester en fonction de l'angle d'inclinaison des fibres a la même allure que celle du pli Sisal/Polyester. Par conséquent, on garde également ici les mêmes observations faites pour ce dernier. Seules les valeurs changent pour le pli Bambou/Polyester.

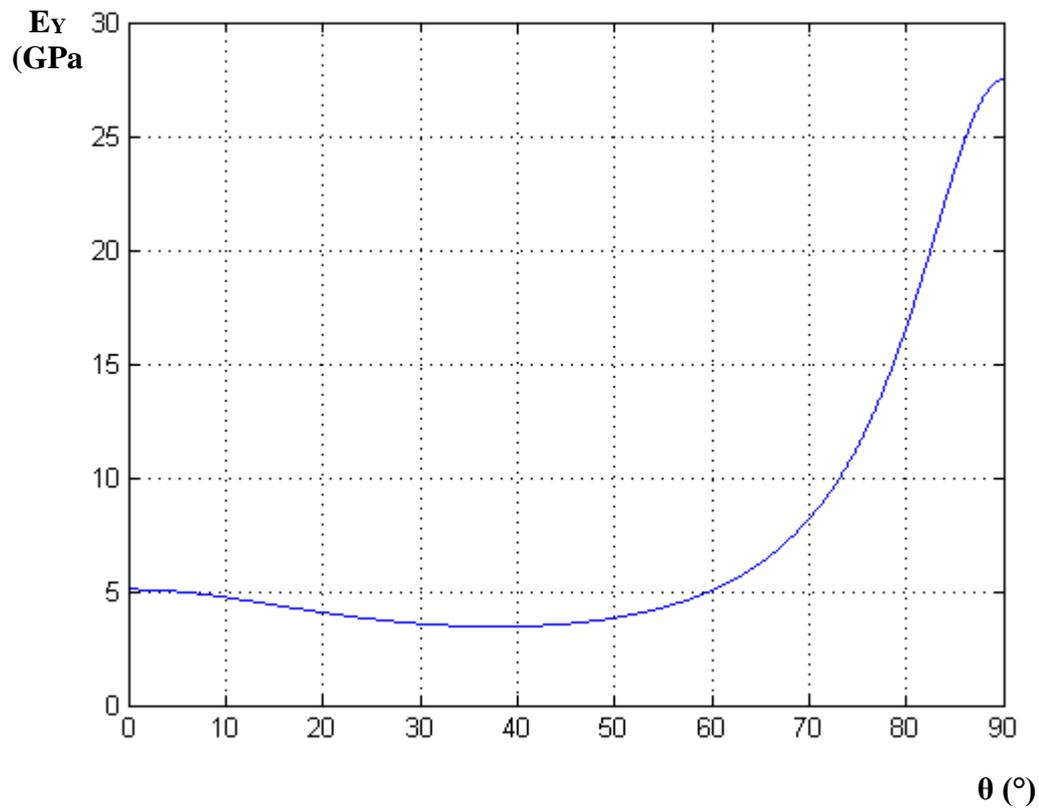


Figure 5-25 : Variation de E_Y du pli Bambou/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

Pour le pli Bambou/Polyester, la variation de E_Y est similaire à celle de E_Y du pli Sisal/Polyester. En effet, le module d'élasticité suivant y augmente aussi rapidement à partir de 50° .

Cette courbe montre bien le fait que la valeur du module d'élasticité la plus élevée pour ce pli est obtenue dans la direction longitudinale des fibres.

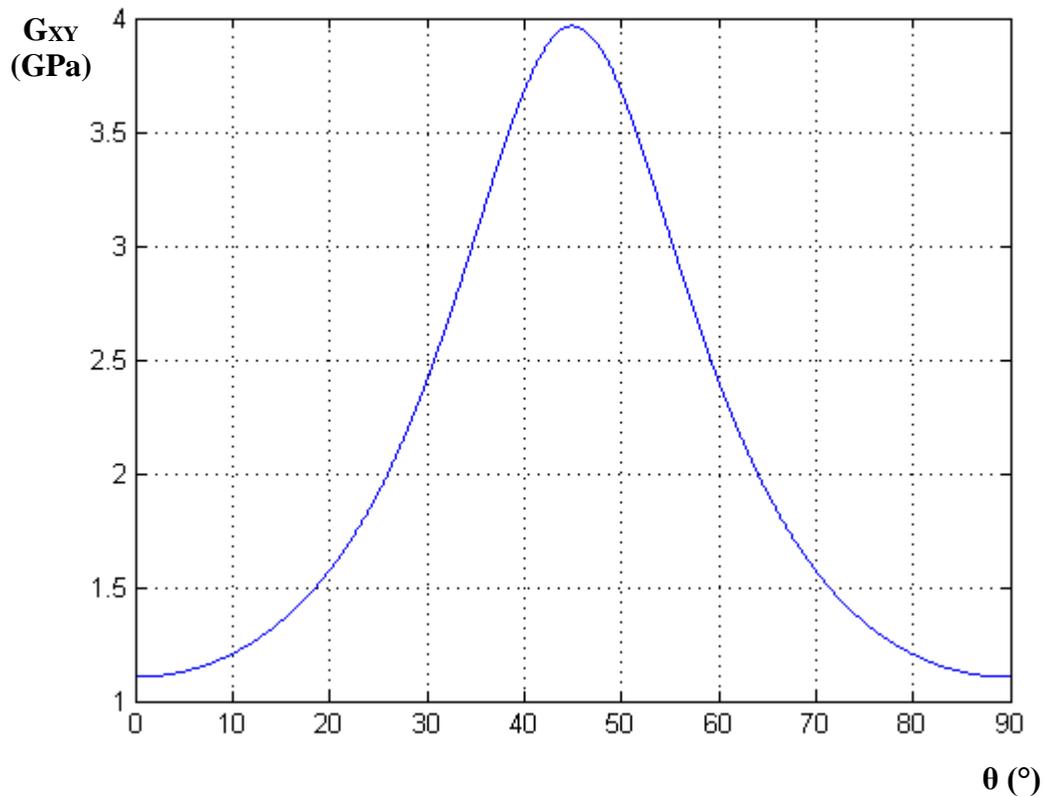
b) Module de cisaillement

Figure 5-26 : Variation de G_{XY} du pli Bambou/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

La valeur maximale du module de cisaillement G_{XY} du pli unidirectionnel Bambou/Polyester est égale à 4 GPa. Cette valeur est obtenue pour un angle d'inclinaison des fibres égal à 45° .

Par ailleurs, c'est en inclinant le pli d'un angle de 0° ou de 90° que la valeur de G_{XY} est minimale. Cette valeur minimale est égale à $G_{12} = 1.1$ GPa.

c) Coefficients de Poisson

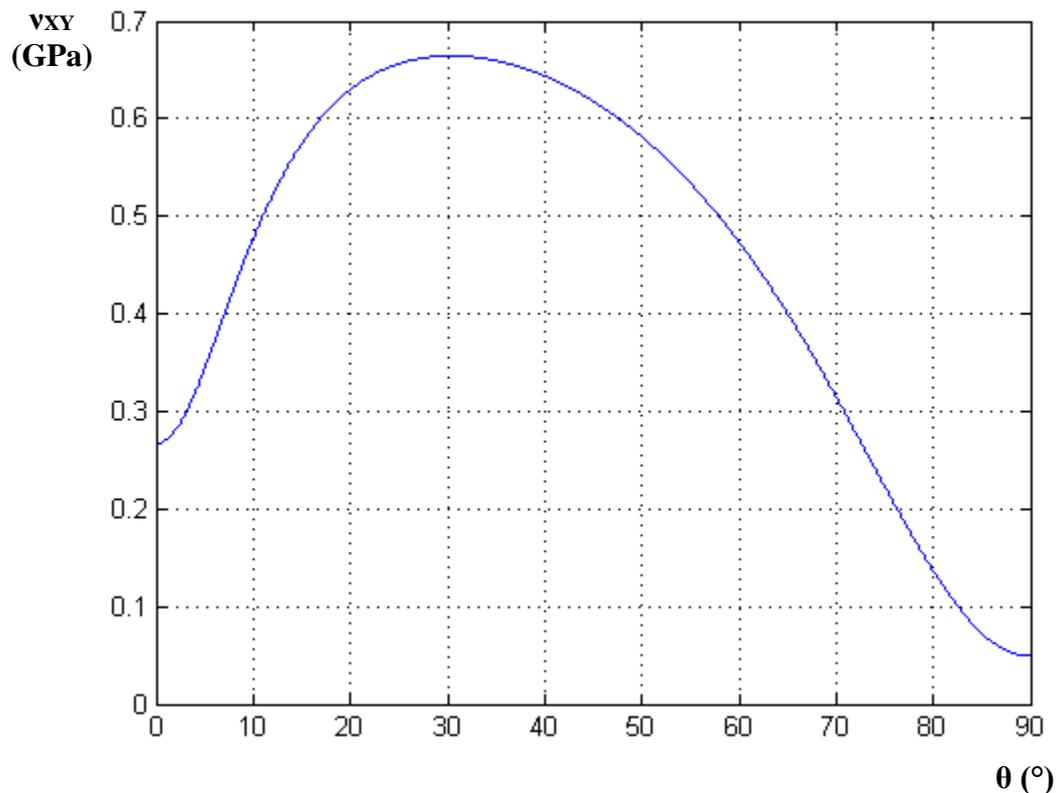


Figure 5-27 : Variation de v_{XY} du pli Bambou/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

La valeur maximale du coefficient de Poisson v_{XY} du pli Bambou/Polyester est atteinte lorsque l'angle $\theta = 30^\circ$. Et la valeur minimale en inclinant le pli d'un angle de 90° .

L'angle d'inclinaison du pli aux alentours de 30° est à éviter si ce pli doit être soumis, par exemple, à une contrainte de traction dans la direction x pour éviter une trop grande déformation dans la direction y.

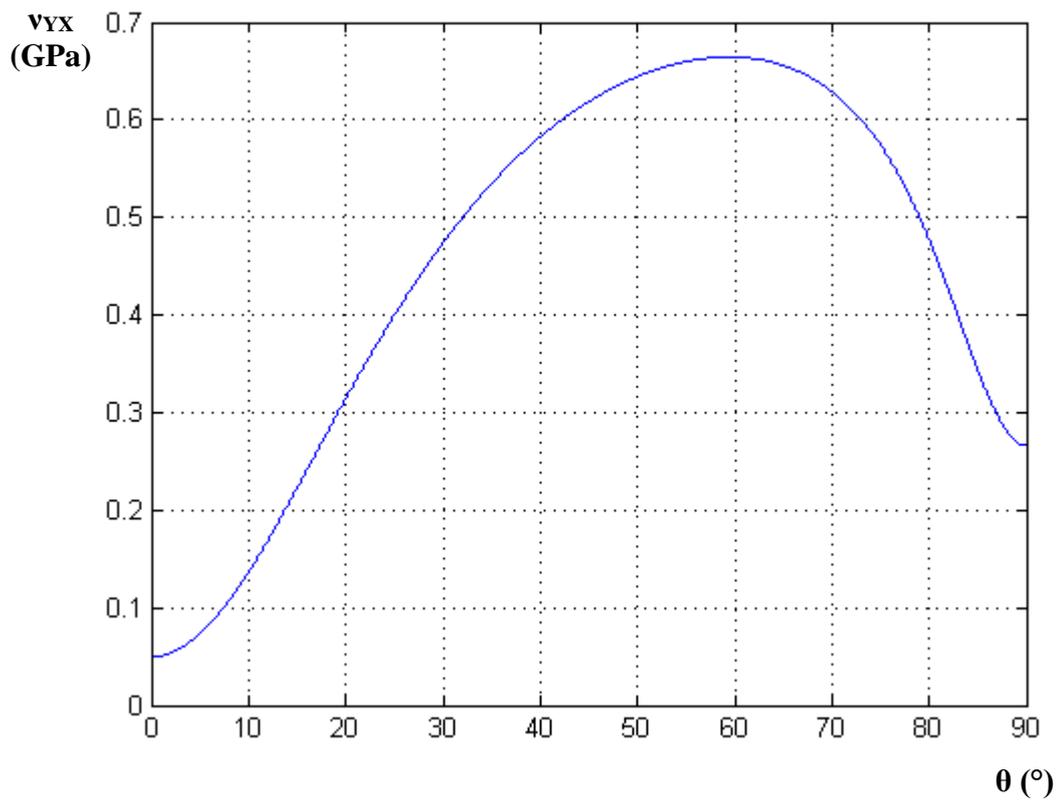


Figure 5-28 : Variation de ν_{YX} du pli Bambou/Polyester en fonction de θ ($M_f = 70\%$)

Trois valeurs de ν_{YX} sont à noter sur cette courbe :

- la valeur minimale correspondant à $\theta = 0$
- la valeur maximale qui se situe aux alentours de $\theta = 60^\circ$
- la valeur intermédiaire qui a lieu lorsque $\theta = 90^\circ$

De $\theta = 0^\circ$ à $\theta = 60^\circ$, ν_{YX} augmente et puis diminue jusqu'à $\theta = 90^\circ$.

Comme dans le cas du pli unidirectionnel Sisal/Polyester, les constantes élastiques et les matrices de rigidité et de souplesse d'un pli Bambou/Polyester, dont l'inclinaison des fibres de bambou est $\theta = 45^\circ$ et la teneur en masse de ces fibres est $M_f = 70\%$, sont donc aussi déterminées.

- Constantes élastiques

$$E_X = 3.577 \text{ GPa}$$

$$E_Y = 3.577 \text{ GPa}$$

$$G_{XY} = 3.965 \text{ GPa}$$

$$\nu_{XY} = 0.618$$

$$\nu_{YX} = 0.618$$

- Matrices de rigidité et de souplesse

$$Q = \begin{bmatrix} 10.042 & 7.831 & 5.668 \\ 7.831 & 10.042 & 5.668 \\ 5.668 & 5.668 & 7.560 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.279 & -0.173 & -0.080 \\ -0.173 & 0.279 & -0.080 \\ -0.080 & -0.080 & 0.252 \end{bmatrix}$$

L'étude des comportements élastiques des deux plis unidirectionnels Sisal/Polyester et Bambou/Polyester vient d'être faite. Mais il serait intéressant de comparer certaines propriétés de ces deux plis avec celles du pli unidirectionnel Verre/Polyester, un des types de matériau composite les plus utilisés actuellement.

D'un autre côté, la rigidité et la légèreté font parties des principales propriétés exigées d'un matériau, en particulier les matériaux composites. C'est pour cette raison que les modules d'élasticité longitudinale ainsi que les masses volumiques des trois plis susmentionnés vont ici être comparés.

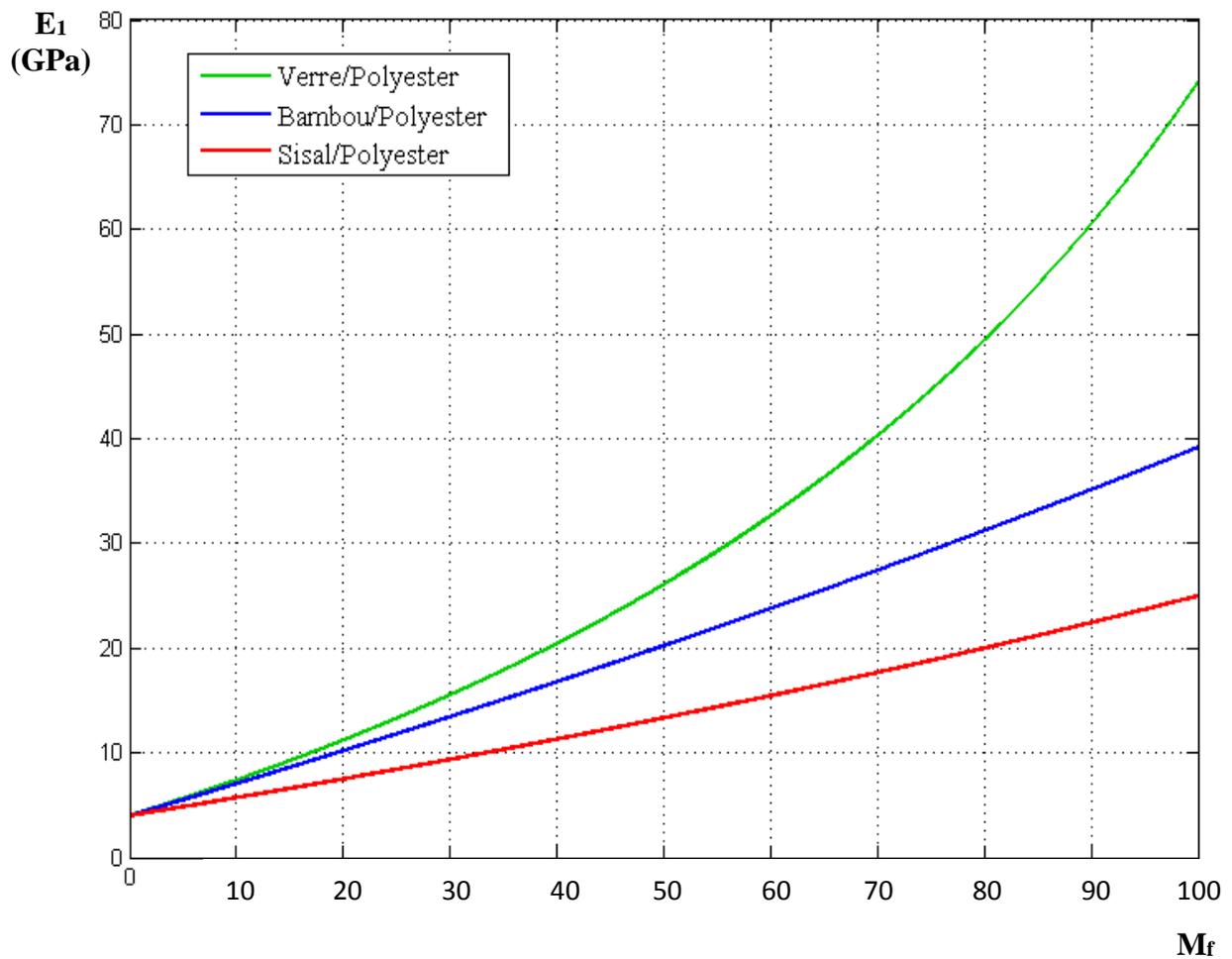


Figure 5-29 : Variation de E_1 en fonction de M_f des plis Sisal/Polyester-
Bambou/Polyester-Verre/Polyester

Cette figure met en exergue le fait que le module d'élasticité longitudinale E_1 du pli Verre/Polyester est supérieur à ceux des deux autres plis pour une teneur en masse des fibres supérieures à 20%. Donc le pli le plus rigide est le Verre/Polyester. Puis, il est suivi par le Bambou/Polyester.

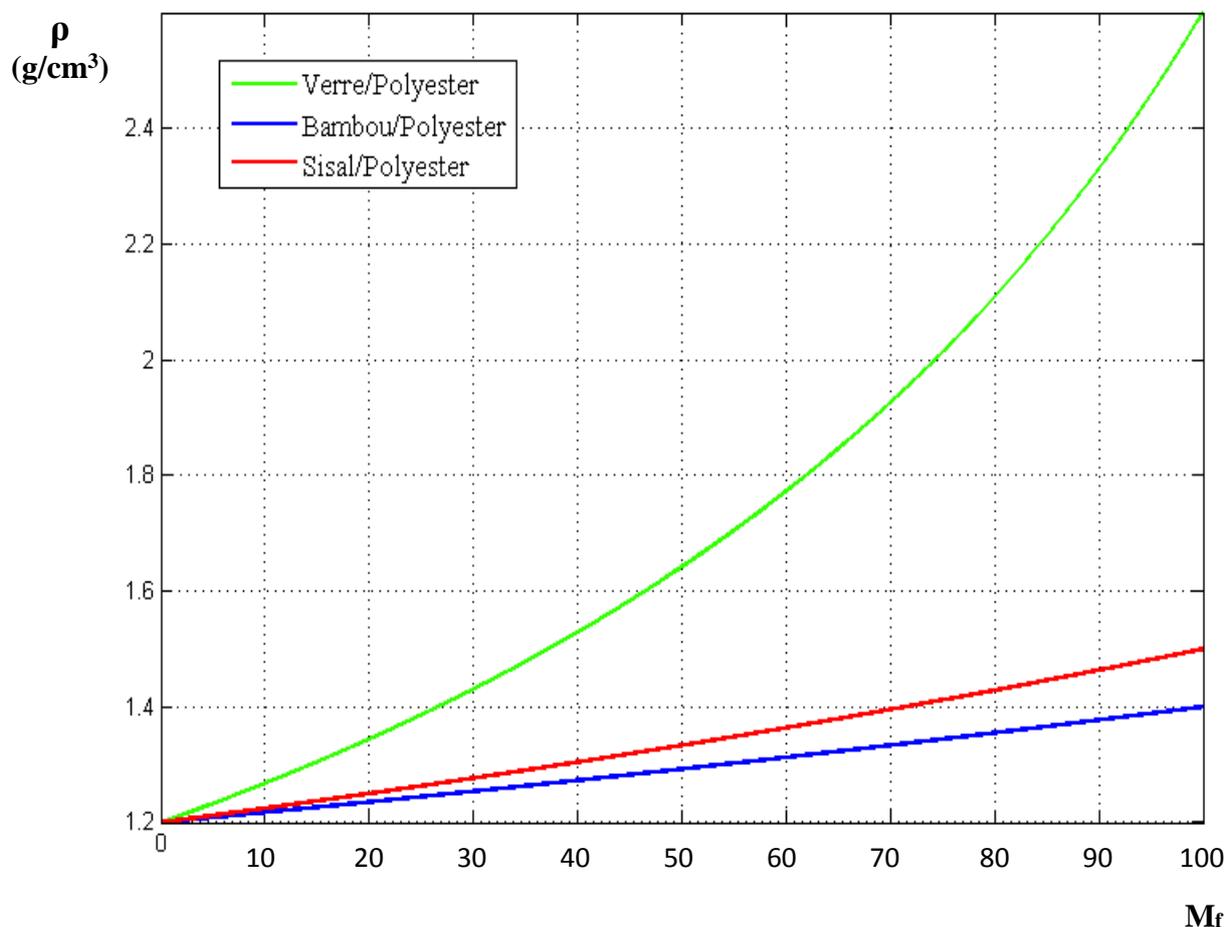


Figure 5-30 : Variation de ρ en fonction de M_f des plis Sisal/Polyester-Bambou/Polyester-Verre/Polyester

La valeur de la masse volumique du pli Verre/Polyester est nettement plus élevée par rapport à celles des plis Sisal/Polyester et Bambou/Polyester pour une teneur en masse des fibres donnée.

5-4- PRECISION DES RESULTATS

Les résultats précédents, dépendant du module d'élasticité longitudinale des fibres, ont été obtenus en prenant comme valeur du module d'élasticité longitudinale des fibres du sisal $E_{f1} = 25$ GPa et du bambou $E_{f1} = 39.2$ GPa.

Toutefois, l'étude bibliographique faite sur les caractéristiques des fibres du sisal et du bambou montre que les valeurs de leur module d'élasticité E_{f1} sont très variables [13].

Pour :

- les fibres de sisal, $E_{f1} = 12$ à 38 GPa
- les fibres de bambou, $E_{f1} = 30$ à 50 GPa

Par conséquent, les modules d'élasticité longitudinale E_1 des plis unidirectionnels Sisal/Polyester et Bambou/Polyester vont également varier. Les courbes suivantes montrent ces variations.

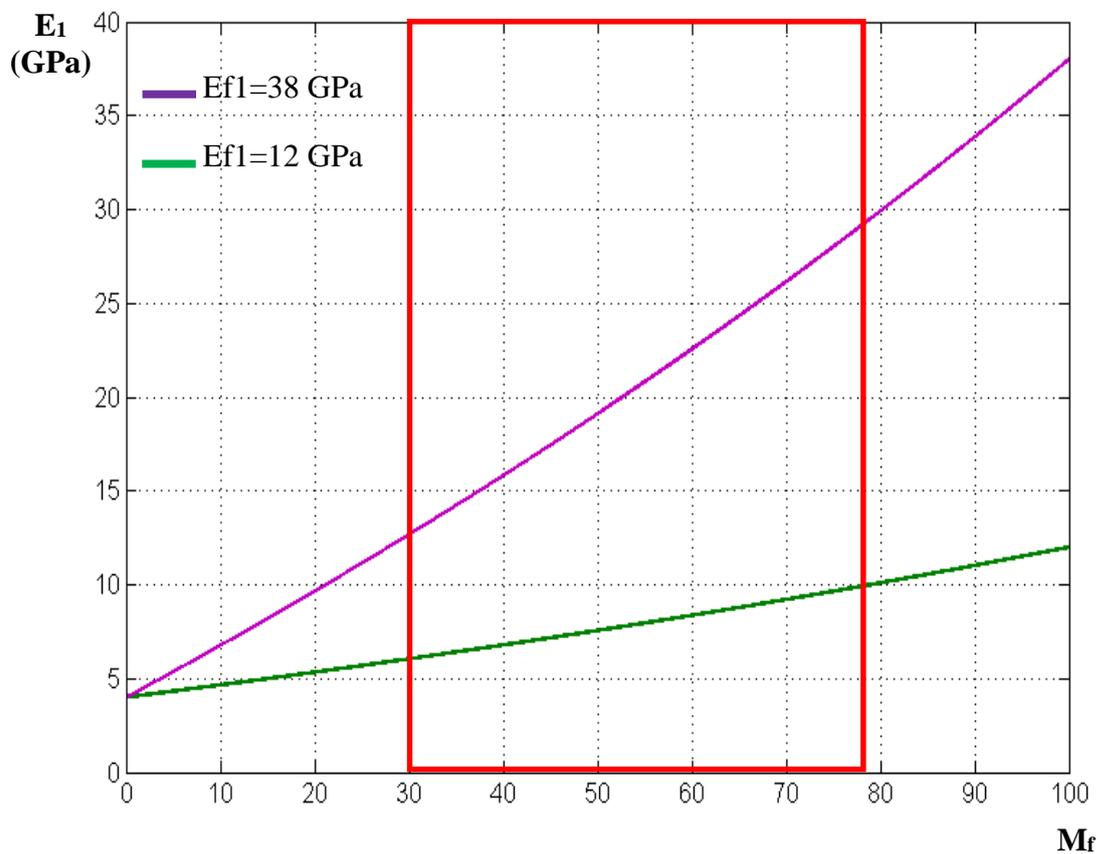


Figure 5-31 : Ecart des valeurs de E_1 du pli Sisal/Polyester en fonction de M_f

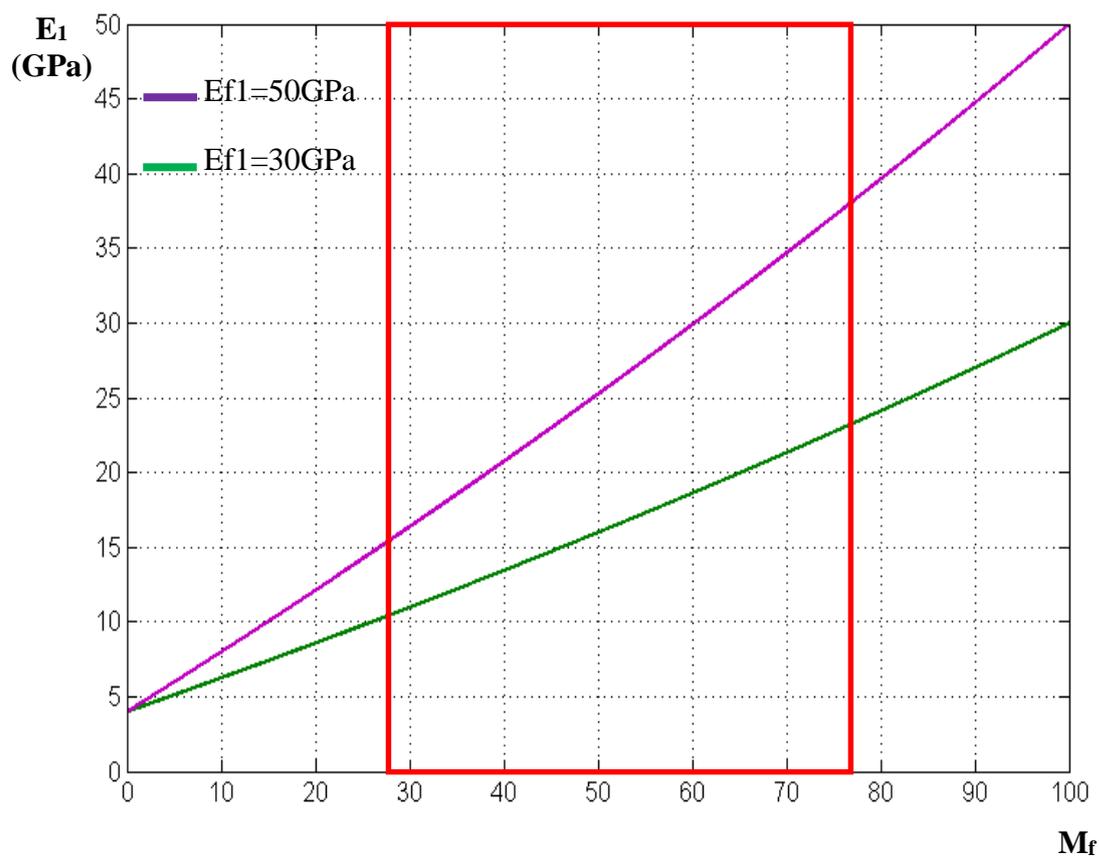


Figure 5-32 : Ecart des valeurs de E_1 du pli Bambou/Polyester en fonction de M_f

Ces figures montrent également que l'écart entre les deux courbes augmente avec la teneur en masse des fibres.

Dans la pratique, la teneur en volume des fibres dans un composite fibreux devrait être comprise entre 25 et 75%. Les valeurs de E_1 des deux plis correspondant sont indiquées dans le tableau suivant.

Tableau 5-3 : Valeurs de E_1

Teneur en volume des fibres		25%	75%
SISAL			
Teneur en masse des fibres		30%	78%
E_1 (GPa)	12	6.04	9.91
	38	12.68	29.13
		9.36 ± 3.3	19.52 ± 9.6
BAMBOU			
Teneur en masse des fibres		28%	77%
E_1 (GPa)	30	10.50	23.28
	50	15.50	38.11
		13 ± 2.5	30.69 ± 7.4

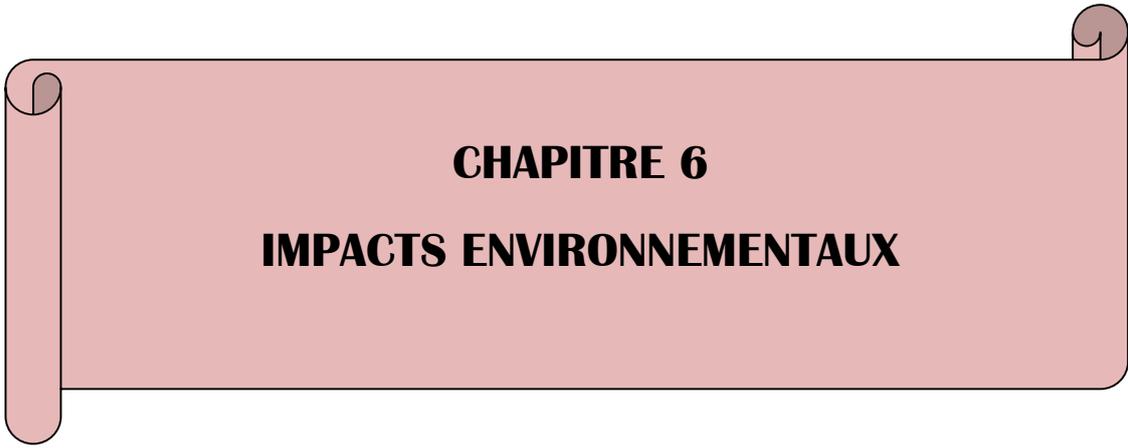
L'étude bibliographique n'a pas permis de collecter plus d'informations concernant les valeurs des autres constantes élastiques.

➤ Les résultats obtenus pour les plis Sisal/Polyester et Bambou/Polyester permettent donc de constater que les courbes qui représentent les variations des constantes élastiques de chaque type de pli unidirectionnel étudié ont respectivement la même allure sauf pour le cas des modules d'élasticité transversale E_2 .

En effet, contrairement à la courbe de E_2 du pli Bambou/Polyester qui croît lorsque M_f augmente, celle du pli Sisal/Polyester décroît.

Toutefois, pour une teneur en masse des fibres donnée, la valeur de E_1 du pli Bambou/Polyester est supérieure à celle du pli Sisal/Polyester ce qui montre que le premier pli est plus rigide que le second.

Pour certains angles d'inclinaison des fibres, les valeurs des constantes élastiques peuvent tout aussi bien être à leurs minimums qu'à leurs maximums. Néanmoins, pour un pli Sisal/Polyester ou Bambou/Polyester soumis à une contrainte de traction, pour limiter la déformation de ce pli dans la direction de cette contrainte, l'orientation des fibres dans cette direction est nécessaire.



CHAPITRE 6
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX



Ces dernières décennies, une baisse continue de la qualité de l'environnement due à l'émission de CO₂, la pollution marine et atmosphérique, la réduction et l'extinction des ressources naturelles et de la biodiversité, ainsi qu'une régression quantitative des formations naturelles ont été observées.

Il est donc nécessaire de connaître les impacts des deux matériaux, qui viennent d'être étudiés, sur l'environnement, à savoir les composites Bambou/polyester et Sisal/Polyester.

6-1- LE BAMBOU ET L'ENVIRONNEMENT

Du point de vue écologique, le bambou est une plante qui grandit très rapidement, c'est une ressource recyclable et totalement durable. L'impact environnemental de sa production est mince, il se cultive déjà dans certaines exploitations agricoles. De plus, le bambou absorbe bien plus de CO₂ que les arbres et libère 30% d'oxygène de plus. L'étroitesse de ses feuilles facilite l'infiltration de l'eau, son système racinaire très dense, constitué de rhizomes, limite l'érosion édaphique et restaure les sols appauvris.

C'est une plante extrêmement résistante, dont la culture ne nécessite ni engrais, ni produit phytosanitaire.

La plantation du bambou est aussi avantageuse car :

- C'est un système d'épuration pour les eaux usées.

Comme on le sait, les bambous sont connus depuis de longue date pour leurs capacités à absorber les toxines, bactéries et autres résidus indésirables présents dans les eaux et les sols.

- Sa plantation joue aussi un rôle dans l'énergie renouvelable.

Un hectare de bambou peut produire de 20 à 40 tonnes de matière sèche par an, si l'on couple cette faculté à son étonnant Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI), le chaume de bambou est une culture idéale pour la production de chaleur.

La plante possède un pouvoir calorifique plus élevé que la plaquette de bois. Il peut donc se substituer au bois, énergie des chaudières, grâce à la production de charbon de bambou. L'utilisation de cette plante dans les pays émergents et en développement pourrait être une réelle alternative au bois, et ainsi remédier au grave problème de la déforestation qui touche la plupart de ces régions.

En revanche, les bambous présentent aussi un inconvénient, ils peuvent devenir invasifs et menacer ainsi la biodiversité des écosystèmes. Toutefois, actuellement, ce problème peut facilement être contrôlé puisque les géotextiles sont maintenant utilisés pour empêcher la dispersion des racines du bambou.

6-2- LE SISAL ET L'ENVIRONNEMENT

Le sisal est la ressource renouvelable par excellence et pourrait aider à relever le défi du changement climatique. Tout au long de son cycle de vie, il absorbe plus de dioxyde de carbone qu'il n'en produit. Au cours de la transformation, il génère principalement des déchets organiques et des résidus de feuilles qui peuvent être utilisés pour produire de la bioénergie et fabriquer des aliments pour animaux, des engrais et des logements écologiques; en fin de cycle, il est totalement biodégradable. Les fibres synthétiques ne possèdent aucune de ces caractéristiques. De surcroît, le sisal réduit l'érosion des sols en raison de ses profondes racines et contribue à une bonne gestion des bassins versants. Planté en haies, il constitue une barrière végétale efficace pour protéger les cultures et les forêts des prédateurs et des intrus. Cependant, comme le bambou, le sisal peut aussi devenir invasif et menacer la biodiversité des écosystèmes mais actuellement, ceci n'est vraiment plus un problème.

6-3- LE POLYESTER ET L'ENVIRONNEMENT

Le polyester insaturé est une résine thermodurcissable. Il ne peut donc être mis en œuvre qu'une seule fois et devient infusible et insoluble après polymérisation. Une fois durci, sa forme ne peut plus être modifiée, un chauffage éventuel ne permettra pas de le fondre. Par conséquent, il n'est pas recyclable, mais on peut néanmoins l'incorporer dans d'autres matériaux comme renfort.

6-5- LES IMPACTS POSITIFS ET NEGATIFS DES COMPOSITES ETUDIÉS SUR L'ENVIRONNEMENT

En résumé, la résine utilisée dans cet étude n'est pas recyclable donc les composites étudiés ne sont pas des produits totalement écologiques. Par ailleurs, une surexploitation des plantes à fibres pourrait causer leur épuisement ou même la disparition des espèces.

Mais, l'utilisation des fibres de sisal et de bambou en tant que renforts des matériaux composites contribue à élargir le domaine d'utilisation des plantes sisal et bambou qui sont des plantes bénéfiques pour la santé de l'environnement. Par conséquent, la valorisation des composites étudiés entraînerait :

- l'utilisation des ressources locales comme le sisal et le bambou (cas de Madagascar)
- la valorisation des plantes à renouvellement rapide
- une bonne gestion des plantes fibreuses

Pour terminer, il faut noter que le sisal et le bambou sont des plantes fibreuses. Les fibres sont donc extraites directement de ces plantes. Ce qui réduit grandement la consommation d'énergie utilisée pour produire ces types de fibres comparées à celle nécessaire à l'obtention des fibres synthétiques.

CONCLUSION

Dans cette étude, à l'aide du logiciel conçu, c'est en variant la teneur en masse des fibres, que ce soit pour le pli unidirectionnel Sisal/Polyester ou bien pour le pli Bambou/Polyester, qu'il a été observé que celle-ci influe énormément sur les valeurs du module d'élasticité longitudinale et des coefficients de Poisson du pli étudié.

Pour une teneur en masse des fibres donnée, la valeur de E_1 du pli Bambou/Polyester est supérieure à celle du pli Sisal/Polyester, ce qui montre que le premier pli est plus rigide que le second. Toutefois, les valeurs des modules d'élasticité transversale et des modules de cisaillement des deux plis ne varient pas trop en fonction de cette teneur.

Il a aussi été vu que les courbes qui représentent les variations des constantes élastiques de chaque type de pli unidirectionnel étudié ont respectivement la même allure sauf pour le cas des modules d'élasticité transversale E_2 . En effet, la courbe de E_2 du pli Bambou/Polyester croît tandis que celle du pli Sisal/Polyester décroît lorsqu'on augmente la teneur en masse des fibres.

Ensuite, pour chacun des plis, en faisant varier l'angle d'inclinaison des fibres pour une teneur en masse de ces dernières égale à 70%, il a été constaté qu'à certains angles d'inclinaison, les valeurs des constantes élastiques peuvent être à leurs minimums ou à leurs maximums. Par ailleurs, les résultats obtenus renforcent le fait que c'est dans la direction longitudinale des fibres que les valeurs des modules d'élasticité des plis sont maximales.

Par la suite, puisque la rigidité et la légèreté font parties des principales propriétés exigées d'un matériau, en particulier les matériaux composites, il a donc été intéressant de comparer les modules d'élasticité longitudinale ainsi que les masses volumiques des plis Sisal/Polyester et Bambou/Polyester avec ceux d'un pli Verre/Polyester. Les courbes ainsi obtenues montrent que la valeur de E_1 de ce dernier est plus élevée par rapport à celles des deux autres plis à fibres végétales. Puis cette valeur est suivie de celle de E_1 du pli Bambou/Polyester et c'est donc le pli Sisal/Polyester qui possède la plus faible valeur du module d'élasticité longitudinale comparée aux deux autres.

Bien que les deux plis Bambou/Polyester et Sisal/Polyester soient moins rigides par rapport au pli Verre/Polyester, ils sont plus légers que ce dernier. Il est à noter que le pli ayant pour renforts des fibres de bambou est plus léger comparé aux plis Sisal/Polyester et Verre/Polyester.

Toutefois, les études faites dans ce travail sont théoriques, donc les courbes et valeurs obtenues sont estimatives, ceci dans le but d'étudier et de prévoir le comportement des deux matériaux. Donc, ces résultats devraient être confirmés par des essais expérimentaux.

Ce travail concerne les fibres non traitées. Par conséquent, il serait également intéressant de penser à déterminer les caractéristiques des deux matériaux étudiés lorsque les fibres sont soumises à des traitements chimiques par exemple.

Références

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Abir MAHFOUDH, « Etude de la production et de la caractérisation de composites bois-plastiques », 125 pages, 2013
- [2]. Antoine LE DIGON, Peter DAVIES, Christophe BALEY, « Etude de la liaison interfaciale fibre de lin / acide poly (L-lactique) », 10 pages, 11 Juin 2009
- [3]. AUTAR K. KAW, « Mechanics of Composite Materials », second edition, 2006
- [4]. Camille MAGNIONT, « Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources », 343 pages, 2010
- [5]. Clément MEIRHAEGHE, « Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France », 84 pages, Mars 2011
- [6]. Cindy FEING KWONG CHAN, Charlotte SANNA, « Le bambou », 15 pages, 2008-2009
- [7]. Ericka JAO JULES, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis diélectrique. », 206 pages, 20 décembre 2001
- [8]. FERREIRA, G., MORENO, A., BERALDO, A., «*Reinforced concrete beam behavior* », 331-337 pages, 2001
- [9]. Flavio de Andrade Silva, Nikhilesh Chawla, and Romildo Dias Toledo Filho, «Mechanical Behavior of Natural Sisal Fibers», 168 pages, 2010
- [10]. GHAVAMI, KHOSROW, « Structural concrete elements reinforced with bambou », 97-

-
- 110 pages, 2001
- [11]. GHAVAMI, K., « *Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams* », pages 281-288, 1995
- [12]. HIDALGO, OSCAR, « *Study of mechanical properties of bamboo and its use as concrete reinforcement: Problems and solutions* », 2001
- [13]. JEC and CELC, « *Flax & Hemp fibres, a natural solution for the composite industry* », 34-36 pages, 2012
- [14]. Mouna MESSAOUD, « *Fonctionnalisation Anti-bactérienne Passive ou Active Supports Textiles par Vole Sol-Gel ou Photochimique* », 222 pages, 2011
- [15]. Nicolas DUJARDIN, « *Un matériau biosource de choix : les fibres naturelles. Caractérisations et applications* », 12 pages, 14 Avril 2014
- [16]. RAJ, VIJAY, « *Treatise on utilization of bamboo as reinforcement in ferrocement* », 371-382 pages, 1991
- [17]. R.S.P. Coutts & Y.Ni, « *Autoclaved Bamboo Pulp Fibre Reinforced Cement* », 1995
- [18]. SURJOKUSUMO, S., NUGROHO, N., « *A study on Dendrocalamus asper as Concrete Reinforcement* », 51-54 pages, 2001
- [19]. W. D. (Rik) Brouwer : « *Natural Fibre Composites in Structural Components : Alternative Applications for Sisal ?* »
-

WEBOGRAPHIE

- [20]. <http://commons.wikimedia.org>, « Hun Bow », 14 Mai 2014
- [21]. <https://fr.wikipedia.org>, « Amiante », 23 juillet 2015
- [22]. <https://fr.wikipedia.org>, « Bambou », 03 Mars 2015
- [23]. <https://fr.wikipedia.org>, « Bombyx du mûrier », 16 mai 2015
- [24]. <https://fr.wikipedia.org>, « Chevrolet Corvette », 22 Juin 2015
- [25]. <https://fr.wikipedia.org>, « Fibre végétale », 25 Avril 2014
- [26]. <https://fr.wikipedia.org>, « Laine », 26 juin 2015
- [27]. <https://fr.wikipedia.org>, « Sisal », 01 Août 2014
- [28]. <https://kulturebambou.wordpress.com>, « Son anatomie »
- [29]. <http://leeloo.chez-alice.fr>, « Histoire »
- [30]. <http://monanneeaucollege.com>, « Basalte »
- [31]. <https://monrevemalgache.wordpress.com>, “Le sisal”, 2011
- [32]. <http://pardalisbleu.fr.gd>, « Alimentation”
- [33]. <http://sud-isolation.com>, « laine mouton »
- [34]. <http://tpearaignee.e-monsite.com>, « Digne d'un grand mathématicien »
- [35]. <http://www.abhaengen.com>, « Macramé Nido Hanging Sofa Sisal XL », 2006
- [36]. <http://www.amiante.inrs.fr>, « L'amiante, c'est quoi ? »
- [37]. <http://www.antiopa.info>, “Argiopes frelons ou Argiope bruennichi et autres araignées à toile géométrique... », 2015
- [38]. <http://www.bw-yw.com>, « Différentes laines animaux »
- [39]. <http://www.cdiscount.com/auto>, « Mat de verre 0,5m² »

- [40]. <http://www.chomarat.com>, « TISSU »
- [41]. <http://www.deco.fr>, « Vidéo soignez bambou envahi mouchérons »
- [42]. <http://www.directindustry.fr>, « Fibre de basalte / hachée », 2015
- [43]. <http://www.fao.org>, « Natural Fibre Composites in Structural Components : Alternative Applications for Sisal ? »
- [44]. <http://www.fao.org>, « Fibre du Futur »
- [45]. <http://www.fao.org>, « future fibres »
- [46]. <http://www.futura-sciences.com>, « Plantation: sisal à Berenty »
- [47]. <http://www.industrie-techno.com>, « History of Composites », 2015
- [48]. <http://www.jardinature.net>, « Bambous »
- [49]. <http://www.laverite.mg>, « Sisal de Madagascar - Production insuffisante », 2015
- [50]. <http://www.lexpressmada.com>, « Un soutien financier pour le bambou », 13 Avril 2015
- [51]. <http://www.naturalfibres2009.org>, « International Year of Natural Fibres »
- [52]. <http://www.presquilegazette.net>, « Des murs en pailles pour une maison écologique »
- [53]. <http://www.snv.jussieu.fr>, « Coupe transversale d'une tige de Bambou », 2001

Auteurs :

RAKOTOMANANA Michaël Godin

RAKOTOMANANA Iréna Arivony

Tel : 033 04 205 48

Tel : 033 12 610 40

Titre :

« ETUDE ET EVALUATION THEORIQUE DES CONSTANTES ELASTIQUES DES DEUX PLS UNIDIRECTIONNELS SISAL/POLYESTER ET BAMBOU/POLYESTER »

Nombre de pages : 110*Nombre de tableaux* : 14*Nombre de figures* : 54*Nombre de photos* : 23**Directeur de mémoire** : Monsieur RASOLDIER Olivier**Résumé :**

Le but de ce travail de mémoire de fin d'études est d'étudier et évaluer théoriquement les constantes élastiques des plis de composites unidirectionnels Sisal/Polyester et Bambou/Polyester dont les renforts sont des fibres longues.

Grace à un logiciel conçu lors de l'étude, les résultats obtenus montrent les variations des constantes élastiques de ces deux plis en fonction de la teneur en masse des fibres et de l'orientation de celle-ci. Ces constantes élastiques ainsi que les matrices de rigidité et de souplesse ont également été déterminées pour les teneurs en volume des fibres égales à 25 et 75 %.

Mots clés : composite, pli, teneur, fibre, polyester**Abstract :**

The purpose of this work is to study and theoretically evaluate the elastic constants of unidirectional laminae Sisal/Polyester and Bamboo/Polyester which reinforcements are long fibers.

Using software designed during the study, the results show elastic constants variations of these two laminae according to the fibers mass content and their orientation. These elastic constants and stiffness and compliance matrix were also determined for fibers volume contents equal to 25 and 75%.

Keywords : composite, lamina, content, fiber, polyester